

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Provádění návarů typu STELLIT 6 na těsnící
prvky šoupátek S43 zhotovených z oceli
15NiCuMoNb5-6-4

Implementation Weld Deposits of STELLIT 6
Type to Sealing Components of Slide Valves
S43 Type Made by 15 NiCuMoNb5-6-4 Steel

Student: Bc. Petr Bytomský
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.

Ostrava 2010

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Bytomský**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie

Téma: **Provádění návarů typu STELLIT 6 na těsnící prvky šoupátek S43
zhotovených z oceli 15 NiCuMONb5-6-4
Implementation Weld Deposits of STELLIT 6 Type to Sealing
Components of Slide Valves S43 Type Made by 15 NiCuMONb5-6-4
Steel**

Zásady pro vypracování:

1. Studium technologií navařování vhodných pro provádění tvrdokovových materiálů na ocel 15 NiCuMONb5-6-4.
2. Návrh postupu navařování spolu s návrhem kontrol návarů dle platných norem.
3. Provedení návarů na vhodně upravené plochy sedel šoupátek.
4. Posouzení návarů z hlediska ovlivnění základního materiálu a jejich mechanických vlastností.
5. Stanovení technologických postupů s ohledem na použité přípravky.

Seznam doporučené odborné literatury:

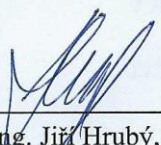
- MOHYLA, P. Nové poznatky v oblasti výzkumu moderních žárovevých ocelí.
In: *TechMat 05. Svitavy 4. listopadu 2005*, Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2005, s.17-21. ISBN 80-7194-803-9.
- MOHYLA, P. KOUKAL, J. Vliv makrostruktury na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli T24. In: *Nové materiály technologie a zařízení pro svařování. Ostrava 19.-21. září 2005*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, ČSÚ Ostrava, 2005, s. 175–180. ISBN 80-248-0898-6.
- KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. (Učební texty pro kurzy IWE/IWT). Ostrava: ZEROSS, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- TURNÁ, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.**


Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry





prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

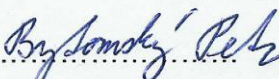
V Ostravě 21.5.2010

Bydomek Petr
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 21.5.2010


podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Nádražní 61 / 641
Bolatice
PSČ: 747 23

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BYTOMSKÝ, P. *Provádění návarů typu STELLIT 6 na těsnící prvky šoupátek S43 zhotovených z oceli 15NiCuMoNb5-6-4 : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 72 s. Vedoucí práce: Hlavatý, I.

Diplomová práce se zabývá realizací návarů typu Stellite na těsnící plochy šoupátek z nízkolegované oceli. V úvodu je provedena studie, v níž je charakterizován základní materiál, u něhož jsou provedeny výpočty trhlinových parametrů, vybrán způsob navařování spolu s přídatným materiálem. Na základě rámcového technologického postupu byl vytvořen dokument pWPS, provedeny nezbytné výpočty vztažené na základní materiál a navrženy kontroly návarů dle platných norem. Po provedení návarů zkušebních vzorků následovalo jejich posouzení a byl stanoven technologický postup navařování pro těsnící plochy šoupátek.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

BYTOMSKÝ, P. *Implementation Weld Deposits of STELLIT 6 Type to Sealing Components of Slide Valves S43 Type Made by 15 NiCuMoNb5-6-4 Steel : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2010, 72 p. Thesis head: Hlavatý, I.

Master thesis is dealing with realization of weld deposits of Stellite type to sealing components of slide valves, which are made by low-alloy steel. At the beginning the study is done, in which a basic material is characterised, in which the calculations of cracks parameters are performed and method of hard surfacing with filler material is chosen. Based on framework of technological progress pWPS dokument was created, the necessary calculations relative to the base material were made and weld deposits controls according to current applicable standards were designed. After weld deposits of test samples had been performed, their assessment followed and technological process for hard surfacing sealing components of slide valves was established.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1 Úvod	11
2 Studium technologií navařování vhodných pro provádění tvrdokovových materiálů na ocel 15NiCuMoNb5-6-4	12
2.1 Navařování	12
2.2 Charakteristika podniku ARMATURY Group a.s.	12
2.3 Volba typového představitele výroby	13
2.4 Žáropevné oceli	16
2.5 Charakteristika základního materiálu 15NiCuMoNb5-6-4	18
2.5.1 Označování materiálu	18
2.5.2 Obecná charakteristika	18
2.5.3 Materiálové vlastnosti a mikrostruktura	18
2.5.4 Chemické složení	21
2.5.5 Mechanické vlastnosti	22
2.6 Svařitelnost a náchylnost na trhliny u oceli 15NiCuMoNb5-6-4	23
2.6.1 Základní kritéria hodnocení svařitelnosti	23
2.6.2 Faktory svařitelnosti dle ČSN EN 1011 – 2	24
2.6.3 Náchylnost na horké trhliny	24
2.6.4 Náchylnost na studené trhliny	25
2.6.5 Opatření k zamezení vzniku studených trhlín	25
2.6.6 Náchylnost na žíhací trhliny	26
2.6.7 Opatření k zamezení vzniku žíhacích trhlín	26
2.6.8 Náchylnost na lamelární trhliny	26
2.6.9 Opatření k zamezení vzniku lamelárních trhlín	27
2.6.10 Podnávarové trhliny a zamezení jejich vzniku	27
2.7 Volba způsobu navařování	27
2.7.1 Charakteristika navařování plazmovým obloukem s přídavným materiálem ve formě prášku	28
2.7.2 Základní výhody plazmového navařování s práškem	30
2.8 Přídavné materiály	31
2.8.1 Přídavný materiál na bázi kobaltu – Stellite 6	31
2.8.2 Výběr konkrétního přídavného materiálu	32
2.9 Navařovací automat PPC 250 PTM	33
3 Návrh postupu navařování spolu s návrhem kontrol návarů dle platných norem	35
3.1 Tvorba postupu navařování	35
3.2 Kvalifikace postupu navařování těsnících ploch šoupátka S43	35
3.3 Zkušební vzorky	36
3.3.1 Rámcový technologický postup výroby zkušebních vzorků	38
3.4 Parametry pro navařování zkušebních vzorků, vztažené na základní materiál 15NiCuMoNb5-6-4	39
3.5 Výpočet ekvivalentního uhlíku	39
3.5.1 Výpočet dle vzorce Mezinárodního svářečského institutu (IIW)	39

3.5.2	Výpočet dle ČSN EN 1011 – 2	40
3.5.3	Zhodnocení výpočtu uhlíkového ekvivalentu	40
3.6	Výpočet rychlosti navařování	41
3.7	Výpočet tepelného příkonu:	43
3.8	Výpočet teploty přehřevu	44
3.8.1	Výpočet teploty přehřevu dle Seferiána	44
3.8.2	Výpočet teploty přehřevu dle ČSN EN 1011 – 2 metoda B.....	45
3.9	Výpočet teplot tepelného zpracování	48
3.9.1	Volba tepelného zpracování – žíhání na snížení vnitřního pnutí.....	48
3.10	Určení teploty Interpass	50
3.11	Návrh kontrol návarů dle platných norem.....	51
3.11.1	Nedestruktivní zkoušení	52
3.11.2	Kritéria přípustnosti u nedestruktivního zkoušení:	52
3.11.3	Destruktivní zkoušení	53
3.11.4	Kritéria přípustnosti u destruktivního zkoušení	54
4	Provedení návarů na vhodně upravené plochy sedel šoupátek upravené třískovým obráběním.....	55
4.1	Příprava navařování zkušebních vzorků	55
4.2	Navařování zkušebního vzorku č. 1	56
4.3	Navařování zkušebního vzorku č. 2	60
5	Posouzení návarů z hlediska ovlivnění základního materiálu a jejich mechanických vlastností	64
5.1	Vizuální kontrola	64
5.2	Zkouška ultrazvuková.....	65
5.3	Předběžná zkouška tvrdosti návaru	67
5.4	Předběžná spektrometrická analýza chemického složení návaru ...	68
5.5	Kapilární zkouška	69
5.6	Zkouška tvrdosti dle Vickerse HV10.....	71
5.7	Chemická analýza návaru	75
5.8	Makroskopická a mikroskopická kontrola	77
6	Stanovení technologických postupů s ohledem na použité přípravky	80
6.1	Technologický postup výroby sedla	80
6.2	Vliv podchlazení při montáži.....	81
6.3	Oprava defektu návaru zjištěného po penetrační zkoušce	81
7	Závěr	82
	Použité zdroje	85
	Elektronické zdroje	87
	Seznam příloh.....	90

Seznam použitých symbolů a zkratek

A_5	Tažnost	[%]
AG	ARMATURY Group a. s.	
ARA	Anizotermický rozpad austenitu	
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)	
C_C , C_E	Uhlíkový ekvivalent	[hm.%]
CE	Uhlíkový ekvivalent dle IIW	[hm.%]
CET	Uhlíkový ekvivalent ČSN EN 1011 – 2	[hm.%]
ČSN	Česká státní norma	
DN	Jmenovitá světlost	[–]
EN	Evropská norma	
HD	Obsah difúzního vodíku ve svarovém kovu 1]	[ml·100g ⁻¹]
HRC	Tvrdost dle Rockwella	
HV	Tvrdost dle Vickerse (též HV5, HV10)	
I	Elektrický proud	[A]
IIW	Mezinárodní svářečský institut (Intranational Institute of Welding)	
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci (Intenational Organization for Standardization)	
KCV	Vrubová houževnatost	[J·cm ⁻²]
KV	Nárazová práce	[J]
M_f	Teplota konce martenzitické přeměny (Martenzit finish)	[°C]
M_s	Teplota počátku martenzitické přeměny (Martenzit start)	[°C]
NDT	Nedestruktivní zkoušení (Non Destructive Testing)	
PN	Jmenovitý tlak	[–]
P_{NB}	Parametr náchylnosti oceli na vznik studených trhlin	[hm. %]
P_{SR}	Trhlinový parametr náchylnosti oceli na žíhací trhliny	[hm. %]
PTA	Plazmové navařování s převedeným obloukem (Plasma Transferred Arc)	
pWPS	Předběžná specifikace svařovacího postupu (Preliminary Welding Procedure Specification)	
PWR	Tlakovodní reaktor (Pressurized Water Reactor)	
Q	Množství tepla přivedeného do návaru na jednotku jeho délky	[kJ·mm ⁻¹]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{mT/T/t}$	Časová pevnost při tečení	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]

R_x	Časová mez tečení	[MPa]
SANS	Maloúhlový rozptyl neutronů (Small Angle Neutron Scattering)	
TEM	Prozařovací elektronová mikroskopie (Transmission Elektron Microscope)	
T_g	Mezní teplota	[°C]
T_{max}	Maximální pracovní teplota	[°C]
TNI	Technické normalizační informace	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
T_p	Teplota předehřevu	[°C]
T_{pCET}	Parametr T_p zahrnující vliv chemického složení	[°C]
T_{pd}	Parametr T_p zahrnující tloušťku svařovaných materiálů	[°C]
T_{pHD}	Parametr T_p zahrnující vliv obsahu difúzního vodíku	[°C]
T_{pQ}	Parametr T_p zahrnující vliv tepelného příkonu	[°C]
U	Elektrické napětí	[V]
U.C.S.	Parametr náchylnosti oceli na vznik horkých trhlin	[hm. %]
WPQR	Protokol o kvalifikaci postupu svařování (Welding Procedure Qualification Record)	
WPS	Specifikace svařovacího postupu (Welding Procedure Specification)	
Z_z	Kontrakce v ose Z	[%]
a	Rozkvy hořáku	[mm]
d	Tloušťka	[mm]
f	Frekvence kyvů hořáku	[s ⁻¹]
h	Tloušťka	[mm]
k	Koeficient metody tepelné účinnosti navařování	[-]
n	Otáčky	[s ⁻¹]
r	Poloměr	[mm]
s	Tloušťka	[mm]
t_v	Doba výdrže na žíhací teplotě	[min.]
v	Rychlost	[mm·s ⁻¹]
v_c	Rychlost navařování	[mm·s ⁻¹]
v_c	Rychlost ochlazování	[°C·h ⁻¹]
v_h	Rychlost ohřevu	[°C·h ⁻¹]
\emptyset	Průměr	[mm]
π	Ludolfovo číslo	[-]
ω	Úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]

1 Úvod

Svařování a navařování patří vedle obrábění, tváření, povrchových úprav a dalších technologií do strojírenské technologie. Rozsahem sice nezaujímá největší objem, rozhodně však patří mezi strojírenské technologie zpracovávající největší množství kovových materiálů – tvářených i litých. Zvládnutí svařování a navařování je závislé na znalostech celé řady přírodovědných oborů, jako jsou matematika, fyzika, chemie, fyzikální metalurgie, nauka o materiálu a další.

Obsahová náplň této práce je zaměřena na praktickou aplikaci navařování tvrdokovového materiálu typu Stellite 6 na těsnicí plochy armatury – šoupátka, které je vyrobeno z oceli 15NiCuMoNb5-6-4. Úvodem je provedena charakteristika základního materiálu, včetně mechanického a chemického složení, materiálových vlastností a mikrostruktury. Následně jsou provedeny výpočty náchylností této oceli k základním typům trhlin, které se během svařování a navařování mohou vyskytovat a je vybrána technologie navařování a přídavný materiál. V další kapitole je sestaven rámcový technologický postup výroby a provedeny výpočty nutné k použití do předběžné specifikace postupu navařování. Následuje návrh kontrol návarů zkušebních vzorků podle platných norem. Po jejich navaření jsou provedeny nedestruktivní a destruktivní kontroly a na základě vyhovujících výsledků stanoven technologický postup výroby spolu s dokumentem specifikace postupu navařování těsnících prvků armatur.

2 Studium technologií navařování vhodných pro provádění tvrdokovových materiálů na ocel 15NiCuMoNb5-6-4.

2.1 Navařování

Navařováním se vytváří u strojních součástí na exponovaných místech či na celém povrchu takové vrstvy vykazující zpravidla větší odolnost, než má základní materiál. Tím zabezpečují požadované vlastnosti celé konstrukce, jako je odolnost proti korozi, tření, otěru, erozi, kavitaci a podobně. Navařování se používá v opravářství a údržbě i při výrobě nových zařízení (navarování jiného materiálu než základní materiál). Nové strojní součásti se vyrábějí z běžnějšího materiálu (nelegované či nízkolegované oceli) spolu s návarovým materiálem používaným jen na místa největšího opotřebení. Takto umožňuje navařování dosáhnout velkých úspor legovacích přísad, celkového zlevnění konstrukce a velké životnosti strojového dílce [3; 7].

Pro procesy navařování lze upravit či přizpůsobit ty metody svařování, které mohou být využitelné jako vhodný zdroj tepla, zabezpečující ohřátí až na teplotu natavení povrchu základního materiálu, natavení přídavného materiálu podávaného ve formě drátu, pásky, trubičky, prášku či tyčinky a zajistit jeho přenos až na navařované místo [3, 27] .

2.2 Charakteristika podniku ARMATURY Group a.s.

Diplomová práce včetně experimentální části je zpracovávána pro společnost ARMATURY Group a. s. (dále jen AG). Tato společnost je českým výrobcem průmyslových armatur, dodavatelem čerpadel, hutního materiálu a automatizovaných systémů ovládání armatur. Svou činnost firma zahájila 1. ledna 2000, kdy došlo k fúzi tří společností operujících na českém a slovenském trhu. AG navazuje na zkušenosti a tradice výroby armatur během padesátileté historie v regionu Opavska a Hlučínska. Výroba prvních vlastních produktů začala v továrně v Dolním Benešově.

Společnost AG nabízí řešení výstavby a rekonstrukce technologických celků pro odběratele na celém světě a kompletní dodávky potrubních celků včetně projektové dokumentace. Firma rozvíjí a uchovává své vlastní know-how, tj. návrh, vývoj a realizaci vlastních výrobních řad armatur s důrazem na jejich bezpečnost, ekodesign a životnost. Dodávky produktů a služeb směřují do těchto průmyslových odvětví:

- Chemie a petrochemie.
- Klasická a jaderná energetika.
- Vodárenství.
- Plynárenství.
- Hutní průmysl.
- Těžební průmysl.

Výrobní program tvoří čtyři pilíře:

- Kulové kohouty.
- Hutní armatury.
- Uzavírací motýlkové klapky, speciální zpětné klapky pro turbíny a uzavírací klapky v provedení kov-kov.
- Armatury pro klasickou i jadernou energetiku.

V České republice AG disponuje pěti provozovnamy. Zahraniční pobočky jsou na Slovensku, Polsku a Rusku. V dalších 17 státech celého světa, např. Číně, Indii a Egyptě, má AG své zástupce. Společnost AG je držitelem certifikátu systému jakosti dle normy DIN EN ISO 9001, certifikátu environmentálního systému jakosti EN ISO 14001, monogramů API Spec Q1 a API Spec 6D, certifikátu jakosti dle GOST-R a certifikátu jakosti ve svařování dle EN ISO 3834-2 [36 – 41].

2.3 Volba typového představitele výroby

Volba typového představitele výroby vyšla z výrobního programu firmy AG. Bylo zvoleno šoupátko typ S43, které je vyrobeno z materiálu, jenž se doposud ve společnosti pro tento typ šoupátka nepoužíval. Strategií je rozšíření výrobního sortimentu a proniknutí na další obchodní trhy a průmyslová odvětví.

Základní parametry šoupátka S43 v přivařovacím provedení:

- Jmenovitý tlak PN: (160 – 400), odpovídá tlakům (16 – 40) MPa.
- Jmenovitá světlost DN: (65 – 400), odpovídá průměrům (65 – 400) mm.
- Maximální pracovní teplota T_{max} : 450°C [41].

Obecně jsou šoupátka uzavírací armatury určené pro vodu, vodní páru, plyny a jiné pracovní látky v energetice, chemickém průmyslu a dalších odvětvích v závislosti na volbě materiálu.

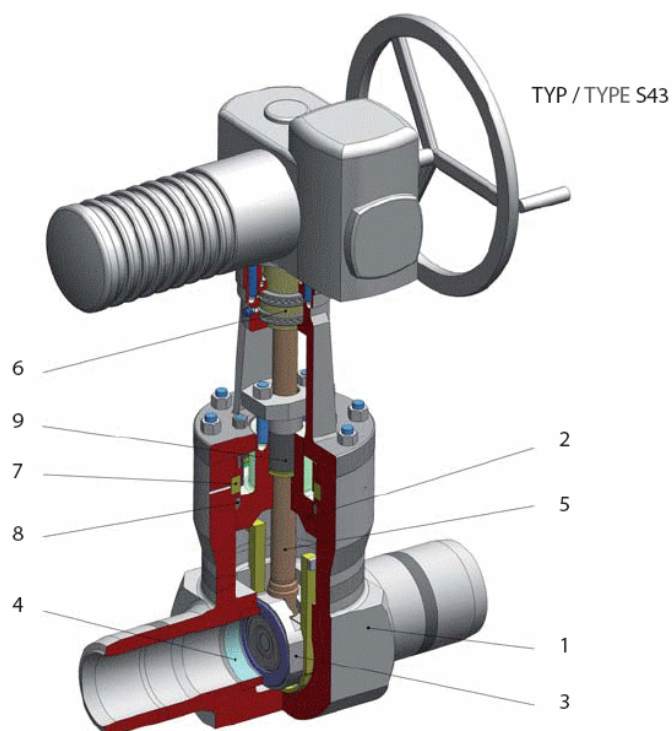
Těleso je výkovek, do něhož se vkládá pružný klín přes třmenové víko nebo přes samotěsnící víko. Na těsnících plochách klínu je navařen tvrdokov a dosednutí klínu do sedel umožňuje přesné vedení v tělese. Sedlové kroužky jsou vevařeny do tělesa a také opatřeny tvrdokovem. Pro utěsnění víka a ucpávky slouží speciální grafitová těsnění. Průtok v tělese je přímý (plnoprůtočný) s minimální tlakovou ztrátou nebo redukovaný. Od tlaku PN 160 je těleso chráněno speciálním membránovým ventilem proti zvýšení tlaku nad klínem. Šoupátka mohou být vybavována jednou až třemi obtokovými armaturami. Ovládání je provedeno ručním kolem, elektropohonem, pneupohonem nebo dálkovým ovládáním.

Šoupátka jsou zkoušena vodou na pevnost, nepropustnost, těsnost uzávěru a funkčnost podle EN 12266. Na základě dohody se provádějí i jiné zkoušky. Je možno je montovat v libovolné poloze a do potrubí mohou být připojena přírubově nebo přivařením [41].

Na (Obr. 2.1) je zobrazena fotografie šoupátka S43 s ovládáním pomocí ručního kola v přivařovacím provedení. Model tohoto šoupátka s ovládáním elektropohonem je na (Obr. 2.2) a v (Tab. 2.1) jsou popsány jeho jednotlivé komponenty.



Obr. 2.1 Šoupátko S43 s ovládáním pomocí ručního kola v přivařovacím provedení [41].



Obr. 2.2 Model šoupátka S43 s ovládáním elektropohonem [41].

Tab. 2.1 Názvy komponent šoupátka S 43 [41].

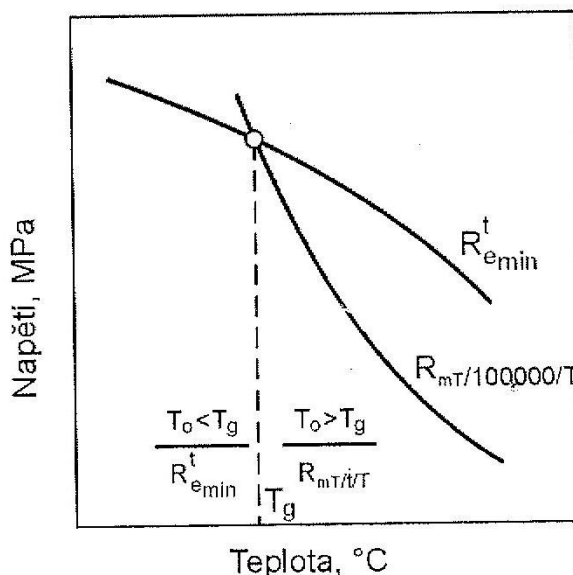
Pozice	Název součásti
1	Těleso
2	Víko tlakotěsné
3	Klín + návar
4	Sedlo + návar
5	Vřeteno
6	Matice vřetena
7	Kroužek dělený
8	Těsnění víka
9	Ucpávka

2.4 Žáropevné oceli

Šoupátko S43 je vyrobeno z materiálu 15NiCuMoNb5-6-4, který obecně spadá do skupiny žárovevných ocelí.

Základními žárovevnými materiály jsou slitiny kovů, především oceli pro práci za zvýšené teploty a slitiny niklu a kobaltu pro práci za vysoké teploty.

V odborné literatuře dosud není jednoznačná definice termínů oceli pro práci za zvýšené teploty, nebo oceli žárovevné, i když odborníci znají tyto rozdíly. Pro pochopení rozdílů těchto termínů je třeba uvažovat pojem mezní teploty T_g , kterou pro daný materiál vyznačuje průsečík dvou charakteristik pevnostních vlastností za zvýšené teploty, tj. minimální hodnoty meze kluzu R_e ($R_{p0,2}$) a časové pevnosti při tečení $R_{mT/t}$ (resp. $R_{Z/t/T}$) [7]. Toto je zobrazeno na (Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Stanovení mezní teploty T_g [18].

Oceli a slitiny, používané pro práci za teploty výše T_g jsou obecně nazývány žárovevnými. Tvrdí se, že pracují v podmínkách tečení, ale pro výpočet hodnot dovoleného napětí se používá časová pevnost při tečení $R_{mT/t}$ nebo časová mez tečení R_x . Tam, kde materiály pracují pod teplotou T_g , procesy tečení neprobíhají, a proto se k výpočtům hodnot dovolených napětí přijímá hodnota meze kluzu. V tomto případě je rozmezí jejich pracovních teplot zpravidla nižší než 400°C. Toto rozmezí se proto označuje jako zvýšené teploty.

Termín „zvýšené teploty“ zahrnuje ovšem materiály pracující jak níže, tak i výše teploty T_g . Vysvětlení vyžaduje také mez (hranice) oddělující „zvýšenou teplotu“ od „vysoké teploty“. S vysokou teplotou se začíná tam, kde oceli nejsou schopny splnit požadavky na žárovevnost, a je proto nezbytně nutné použít superslitiny Fe, Co a Ni. Současně s rozvojem žárovevných ocelí se tato mez mění [18].

Žárovevné oceli jsou používány hlavně pro konstrukci energetických strojů a zařízení, tj. kotlů a rozvodů páry, zásobníků, parních a plynových turbín, turbokompresorů, armatur a prvků upevňujících tepelné stroje. Využívány jsou také v klasické i jaderné technice, v petro a karbochemii a dalších oblastech chemie vysokých teplot, v průmyslu přetváření surovin, v konstrukci technologických zařízení, v letectví, v kosmonautice a ve zbrojařském průmyslu.

Základní požadavek, který musí splnit všechny žárovevné materiály, je zachování určitých mechanických vlastností při vyšší teplotě. Teplota sice není jediným činitelem, který rozhoduje o deformačních procesech a poškození, ale je nejdůležitějším faktorem. Mezi požadavky kladené na všechny žárovevné materiály patří:

- Vysoká dlouhodobá pevnost při tečení.
- Vysoká mez kluzu a pevnost v tahu.
- Dobrá tvárnost, tažnost a odolnost proti křehkému porušení.
- Vysoká odolnost proti teplené a tepelně mechanické únavě během exploatace – zejména proti nízkocyklové únavě.
- Stabilita struktury a vlastnosti, nízká náchylnost jak k poklesu zpevnění, tak i k nárůstu zpevnění a provozní křehkosti.
- Výhodné fyzikální vlastnosti – pokud možno vysoký součinitel tepelné vodivosti a nízký součinitel tepelné roztažnosti.
- Dobrá žárovzdornost a korozní odolnost v prostředí spalin a vodní páry.
- Dobré technologické vlastnosti – vhodnost k tváření, svařitelnost.
- Poměrně nízká cena [18].

2.5 Charakteristika základního materiálu 15NiCuMoNb5-6-4

2.5.1 Označování materiálu

Materiál 15NiCuMoNb5-6-4 dle EN 10216 – 2 je feriticko–bainitická nízkolegovaná ocel [44; 50]. Její obchodní označení v Německu je WB 36 [54]. Tato ocel též bývá též označována 15NiCuMoNb5 [49], nebo jen 15NiCuMoNb [18]. Číslo materiálu je: No 1.6368 [35].

2.5.2 Obecná charakteristika

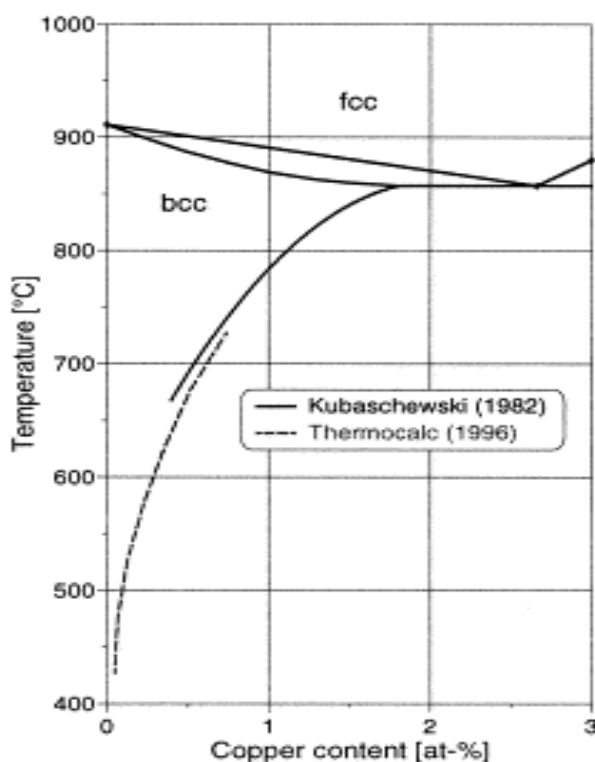
Tato nízkolegovaná žárovečná ocel je používána v podobě trubek a nádob v reaktorech typu BWR (horkovodní) a PWR (tlakovodní) v německých jaderných elektrárnách. Jednou z příčin jejího širokého použití je zvýšená mez kluzu $R_{p0,2}$ za zvýšených teplot. Navíc je tepelné zpracování hospodárné, protože feriticko-bainitická struktura s poměrně vysokým obsahem bainitu a bez jakéhokoliv perlitu je výsledkem ochlazování na vzduchu po austenitizaci. Toto je možné v důsledku obsahu niklu a molybdenu v oceli [35].

Běžné tepelné elektrárny používají tento materiál v provozních teplotách až do 450°C, zatímco Německé jaderné elektrárny jej používají převážně pro potrubí s provozní teplotou pod 300°C a v některých ojedinělých případech v tlakových nádobách do 340°C [1; 2; 17; 28].

2.5.3 Materiálové vlastnosti a mikrostruktura

Pro tento materiál je typický obsah mědi, niklu a niobu, stejně jako zvýšené hodnoty manganu, spolu se sníženým obsahem chrómu. Ve srovnání s dvěma dalšími typickými druhy ocelí, používaných pro konstrukce nádob – 15Mo3 a 13CrMo44, existují podstatné rozdíly ve vztahu pevnostního významu. Mez kluzu při 350°C u materiálu 15NiCuMoNb5-6-4 má vždy dvojnásobnou hodnotu vůči oběma obdobným ocelím. Spolu s její žárovečností se tím objasňuje značné používání v rozsahu středních teplot [35].

Objasnění změn vlastností materiálu 15NiCuMoNb5-6-4 po provozu vyplývá ze znalostí fázového diagramu Fe-Cu, dostupných v současné době, který je zobrazen na (Obr. 2.3). Rozpustnost mědi v oceli při teplotách pod přibližně 650°C byla neznámá do roku 1980 [12, 23]. Předpokládalo se, že ocel tepelně zpracovaná při teplotách mezi (550 – 650)°C by neměla obsahovat žádnou rozpuštěnou měď [11]. Toto je již nyní známo, nicméně ocel 15NiCuMoNb5-6-4 žíhaná při tomto teplotním rozmezí ještě obsahuje znatelné množství mědi v tuhém roztoku [31]. Z toho důvodu je požadované zvýšení pevnosti materiálu způsobeno jen částí legující mědi. Další část mědi je stále ještě jako tuhý roztok v materiálu před jeho uvedením do provozu. Během dlouhodobého provozu při teplotách nad 320°C pomalu precipituje a může vést k nežádoucímu zvýšení tvrdosti a k poklesu pevnosti. O těchto precipitačních procesech je hodně napsáno, ale mimochodem ne pro ocele, ale spíše jen pro model slitiny železo-měď [10, 13, 14, 25, 26].

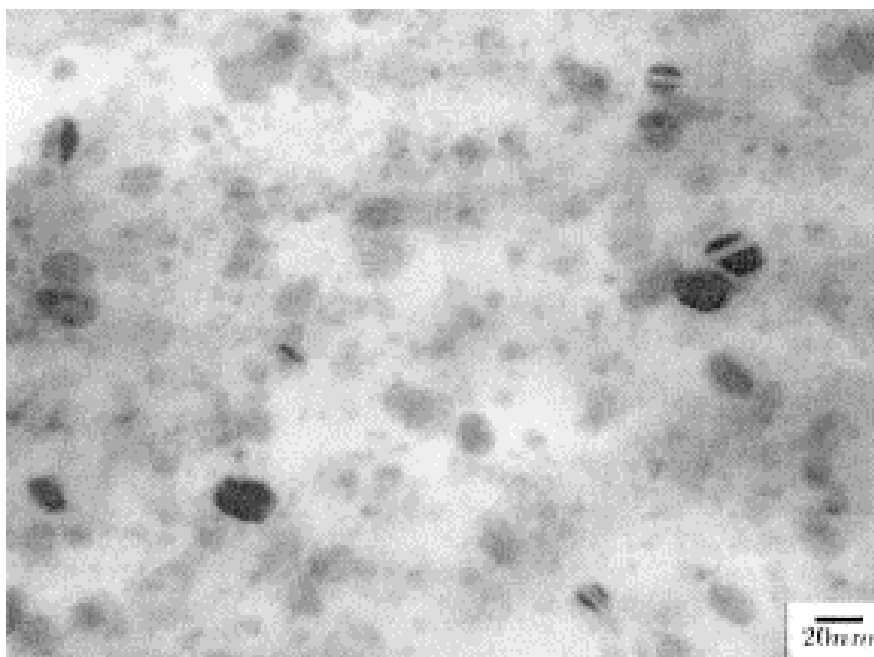


Obr. 2.3 Fázový diagram Fe-Cu [35].

První výsledky týkající se precipitace mědi během provozu v materiálu 15NiCuMoNb5-6-4 byly nastíněny v roce 1992 [29]. Další výzkumy byly uskutečněny v roce 1995 [34] a v roce 1998 [30].

Na (Obr. 2.4) je zobrazena fotografie z prozařovací elektronové mikroskopie (dále jen TEM – transmission elektron microscope), odkrývající materiál po provozu.

Jsou v něm přítomny částice mědi o velikostech od (2 – 20) nm. Některé z částic mají zdvojenou strukturu, rozpoznatelnou typickými pruhy. Zkoumáním pomocí TEM byly mimo jiné zjištěny částice mědi, mající tři odlišné krystalové struktury, závisující na jejich velikosti. Až do 6 nm jde o kubickou prostorově centrovanou mřížku, stejně jako okolní matrice. Nad velikost 20 nm se jedná o kubickou plošně centrovanou mřížku, jako čistá měď. Mezi velikostmi přibližně (6 – 20) nm jde o přechodnou strukturu částic, které tvoří asi 50 % všech částic viditelných TEM. Díky nim dochází v jejich okolí k výrazné distorzi krystalické mřížky [35].



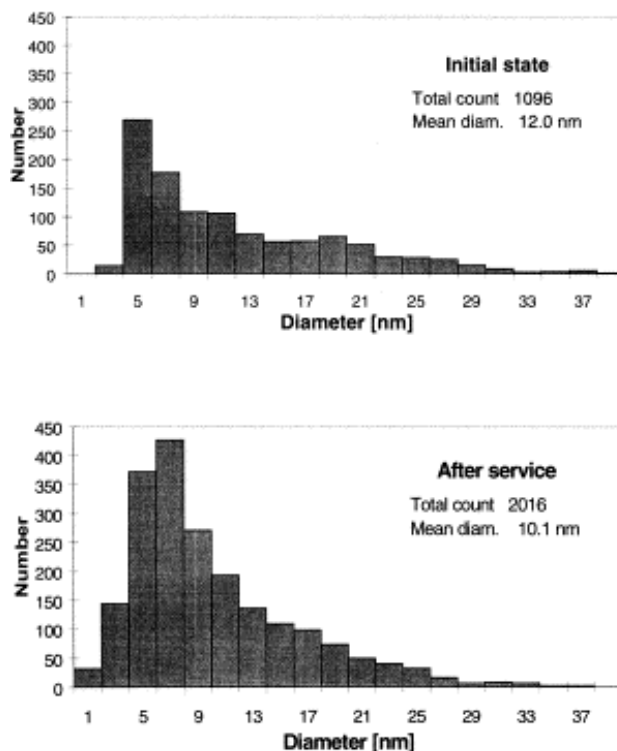
Obr. 2.4 Precipitáty mědi v materiálu 15NiCuMoNb5-6-4 po dlouhodobém provozu [35].

Četnosti precipitovaných částic mědi viditelných pomocí TEM v závislosti na jejich velikosti jsou zobrazeny na (Obr. 2.5). Materiál před uvedením do provozu je zobrazen nahoře a po provozu dole. V obou případech byl analyzován přibližně stejný objem materiálu.

Umístění maxima, rozložení a průměrné velikosti částic se významně neliší, na rozdíl od celkového počtu částic v materiálu po provozu, který je přibližně dvakrát tak vysoký než při stavu materiálu před provozem. Výsledky vyšetřování pomocí TEM ukazují, že počet částic se během provozu zvyšuje u všech tří velikostních skupin.

Dále bylo TEM prokázáno, že počet a velikost rozložení precipitátů mědi jsou prakticky stejné pro materiál v původním stavu i po provozu a dodatečném žíhání

na snížení pnutí – při teplotě posledního tepelného zpracování na snížení vnitřního pnutí. V doplňkovém šetření s využitím techniky měření malouhlovým rozptylem neutronů (SANS – Small Angle Neutron Scattering) bylo dodatečně nalezeno množství částic, mající rozměry přibližně 1 nm, jež nelze zjistit TEM [35].



Obr. 2.5 Graf závislosti četnosti precipitátů mědi na jejich velikosti u oceli 15NiCuMoNb5-6-4 [35].

2.5.4 Chemické složení

Chemické složení oceli 15NiCuMoNb5-6-4 s rozmezím hodnot popř. s maximálními hodnotami těchto chemických prvků v [hm. %] je zaznamenáno v (Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Chemické složení oceli 15NiCuMoNb5-6-4 [18; 35, 44; 47; 49; 50].

Chemický prvek	C	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	Nb	Al	Cr	P	S	N
Min. hodnota [hm. %]	0,1	0,8	0,25	1,0	0,25	0,5	0,015	0,015				
Max. hodnota [hm. %]	0,17	1,2	0,5	1,3	0,5	0,8	0,045	0,05	0,3	0,025	0,02	0,02

Charakteristika nejdůležitějších chemických prvků této oceli, které ji odlišují od ostatních druhů nízkolegovaných ocelí:

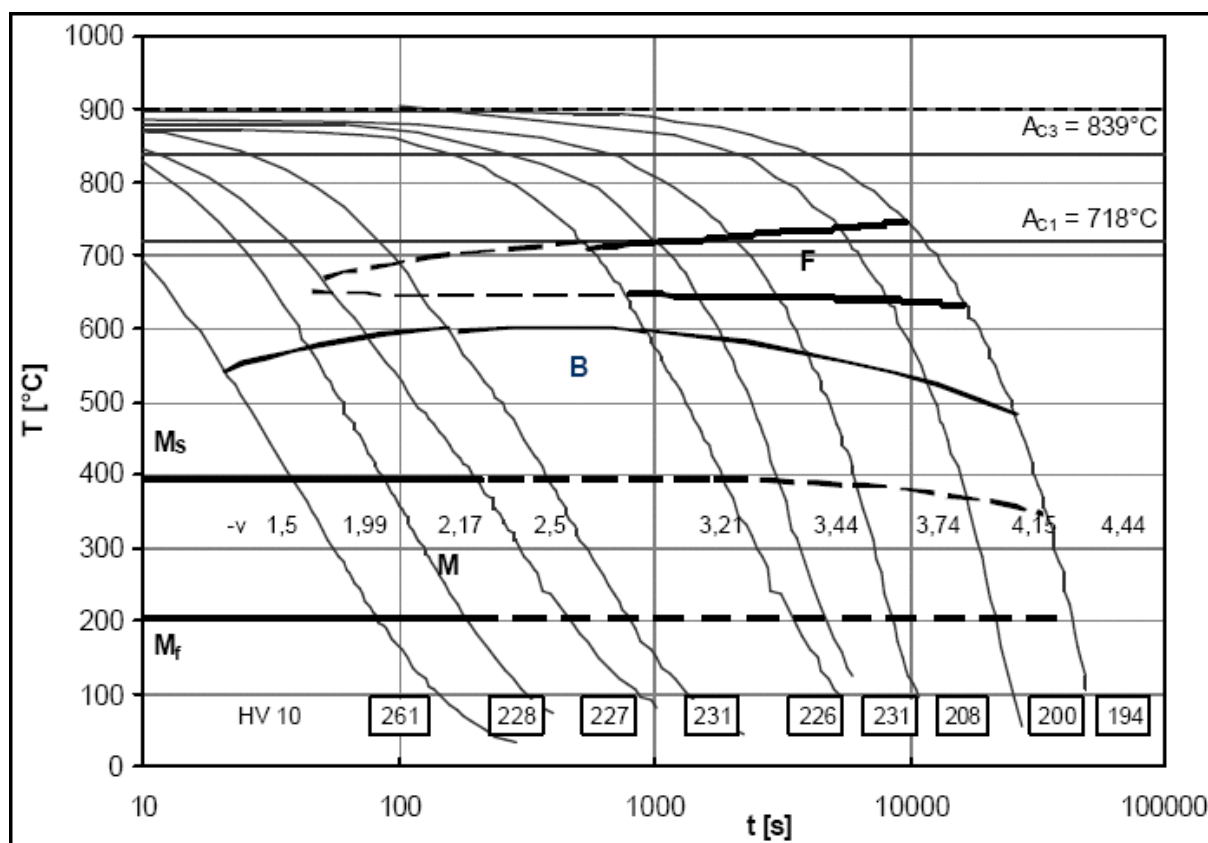
Měď snižuje rychlost koroze – vytváří nepropustnou oxidickou vrstvu. Nikl zlepšuje plastické vlastnosti ocelí. Chrom a Molybden jsou karbidotvorné prvky, precipitačně zpevňující oceli i svarové kovy. S rostoucím obsahem Cr se zvyšuje též odolnost proti korozi [20]. Niob se používá především pro omezení zrna austenitu v průběhu dlouhodobé výdrže na vysokých teplotách ohřevu během tepelného zpracování na jakost [8; 9]. S uhlíkem se spojuje na intersticiální karbidy, které jsou chemicky netečné, mají kovové vlastnosti a jsou žáruvzdorné [60].

2.5.5 Mechanické vlastnosti

Základní mechanické vlastnosti oceli 15NiCuMoNb5-6-4 uvádí (Tab. 2.3). ARA diagram této oceli je zobrazen na (Obr. 2.6)

Tab. 2.3 Mechanické vlastnosti oceli 15NiCuMoNb5-6-4 [18; 35, 44; 47; 49; 50].

Mez pevnosti R_m [MPa]	570-780
Mez kluzu R_e min., 20°C [MPa]	430
Mez kluzu R_e min., 350°C [MPa]	353
Mez kluzu R_p 0,2 min [MPa]	412
Tažnost A_5 [%]	16-20
Nárazová práce KV min., 0°C [J]	27
Nárazová práce KV min., 20°C, příčně [J]	27
Nárazová práce KV min., 20°C, podélně [J]	40
Vrubová houževnatost KCV min, 20°C, podélně [$J \cdot cm^{-2}$]	69
Žáruvzdornost [°C]	500
Pracovní teplota max. [°C]	450



Obr. 2.6 ARA diagram oceli 15NiCuMoNb 5-6-4 [54].

2.6 Svařitelnost a náchylnost na trhliny u oceli 15NiCuMoNb5-6-4

2.6.1 Základní kritéria hodnocení svařitelnosti

Svařitelnost je komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností při určitých metalurgických, konstrukčních a technologických možnostech s cílem dosažení požadované jakosti, spolehlivosti a životnosti svarového spoje.

Svařitelnost podle IIW – IIS se určuje především podle chemického složení, tj. podle obsahu uhlíku, nečistot, legujících prvků, povrchově aktivních prvků, vodíku a podle tloušťky svařovaného materiálu. Teplotu předehřevu lze určit v relaci s tepelným příkonem [3].

2.6.2 Faktory svařitelnosti dle ČSN EN 1011 – 2

Vlastnosti a kvalita svarů jsou ovlivněny zejména podmínkami svařování. Proto by měly být vzaty v úvahu následující faktory:

- Návrh spoje.
- Vodíkem indukované praskání.
- Houževnatost a tvrdost tepelně ovlivněné oblasti (TOO).
- Krystalizační praskání.
- Lamelární praskání.
- Koroze [21].

Pro veškeré další výpočty, v nichž je zapotřebí chemického složení základního materiálu, byly použity maximální hodnoty v [hm. %] dle (Tab. 2.2) Chemické složení oceli 15NiCuMoNb5-6-4.

2.6.3 Náchylnost na horké trhliny

Náchylnost oceli na vznik horkých trhlin lze posoudit číslem *U.C.S.* dle [3]:

$$U.C.S. = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb + 40 \cdot Ni + 12 \cdot Si + 5,4 \cdot Mn \quad (1)$$

Kde: *U.C.S.*parametr náchylnosti oceli na vznik horkých trhlin [hm. %]

Výpočet parametru UCS dle (1):

$$\begin{aligned} U.C.S. &= 230 \cdot 0,17 + 190 \cdot 0,02 + 75 \cdot 0,025 + 45 \cdot 0,045 + 40 \cdot 1,3 + 12 \cdot 0,5 + 5,4 \cdot 1,2 \\ U.C.S. &= 111,28 \text{ hm. \%} \end{aligned}$$

Ocel je náchylná k trhlinám za horka, když $10 < U.C.S. < 30$ [3]. Výsledná hodnota $U.C.S. = 111,28 \text{ hm. \%}$. Tato hodnota se nenachází v rozmezí hodnot, pro něž je ocel náchylná k trhlinám za horka, proto ocel není náchylná ke vzniku horkých trhlin.

2.6.4 Náchylnost na studené trhliny

Náchylnost oceli na vznik studených trhlin lze určit pomocí vztahu autorů Tanaky a Kitady pro oceli s vyšším obsahem manganu (0,8 – 2,5) hm.%. Jedná se o parametr praskavosti P_{NB} [32].

$$P_{NB} = C + \frac{\text{Si}}{20} + \frac{\text{Mn}}{20} + \frac{\text{Cu}}{20} + \frac{\text{Cr}}{30} + \frac{\text{Mo}}{20} \quad (2)$$

Kde: P_{NB}parametr náchylnosti oceli na vznik studených trhlin [hm. %]

Výpočet parametru praskavosti P_{NB} dle (2)

$$P_{NB} = 0,17 + \frac{0,5}{20} + \frac{1,2}{20} + \frac{0,8}{20} + \frac{0,3}{30} + \frac{0,5}{20}$$
$$P_{NB} = 0,33 \text{ hm. \%}$$

Ocel je náchylná na studené trhliny, pokud je parametr praskavosti $P_{NB} \geq 0,25 \text{ hm. \%}$ [32]. V tomto případě je ocel náchylná na studené trhliny, neboť hodnota parametru praskavosti je rovna $P_{NB} = 0,33 \text{ hm. \%}$.

2.6.5 Opatření k zamezení vzniku studených trhlin

Pro zamezení vzniku studených trhlin je nutné:

- Používat nízkovodíkové technologie svařování.
- Pečlivě provádět sušení přídavných materiálů před použitím.
- Zabránit navlhnutí přídavných materiálů v průběhu skladování a manipulace.
- Aplikovat předehřev, dohřev, používat vyšší měrný příkon svařování.
- Minimalizovat vznik zbytkových napětí po svařování volbou vhodné techniky svařování.
- Vyvarovat se ostrých vad, zejména v kořenové oblasti (neprůvary, studené spoje, zápaly), které jsou místy koncentrace napětí a iniciace trhlin v průběhu svařování výplňových vrstev [20].

2.6.6 Náchylnost na žíhací trhliny

Náchylnost svarového kovu na vznik žíhacích trhlin je charakterizována trhlinovým parametrem P_{SR} dle Ita. Omezení rovnice: pro nízkolegované oceli s max. obsahem Cr do 1,5 hm.% [16]. Metoda je v tomto případě použitelná.

$$P_{SR} = Cr + Cu + 2 \cdot Mo + 10 \cdot V + 7 \cdot Nb - 5 \cdot Ti - 2 \quad (3)$$

Kde: P_{SR} trhlinový parametr náchylnosti oceli na žíhací trhliny [hm. %]:

Výpočet trhlinového parametru dle (3):

$$P_{SR} = 0,3 + 0,8 + 2 \cdot 0,5 + 7 \cdot 0,045 - 2$$

$$P_{SR} = 0,415 \text{ hm. \%}$$

Ocel je náchylná na žíhací trhliny, jestliže hodnota $P_{SR} > 0$ hm.% [16]. V tomto případě tato hodnota rovna $P_{SR} = 0,415$ hm. %. Ocel je náchylná na vznik žíhacích trhlin.

2.6.7 Opatření k zamezení vzniku žíhacích trhlin

Náchylnost vzniku žíhacích trhlin při nízkých teplotách je možné snížit rychlostí ohřevu v teplotní oblasti do 400°C, zvláště v prvních stádiích do 250°C. Tato rychlost se má u materiálů náchylných na vznik žíhacích trhlin a u velkých tloušťek svarků pohybovat v rozsahu (15 – 30)°C·h⁻¹. Totéž platí pro rychlosti ochlazování z žíhací teploty.

Další možností je ponechání svarového spoje mezi svařováním a žíháním na mezioperační teplotě (150 – 300)°C a z této teploty žíhat [21].

2.6.8 Náchylnost na lamelární trhliny

Náchylnost kovu na vznik lamelárních trhlin je charakterizována parametry praskavosti dle obsahu síry či dle množství vměstků. Ovšem omezující podmínky daných parametrických rovnic je v tomto případě neumožňují použít. Proto je nutno předpokládat, že ocel 15NiCuMoNb5-6-4 může být náchylná na lamelární trhliny.

2.6.9 Opatření k zamezení vzniku lamelárních trhlin

Pro zamezení vzniku lamelárních trhlin je nutné:

- Použít základní materiály se zaručenou kontrakcí ve směru osy $Z_z \geq 15\%$.
- Zlepšení čistoty oceli, snížení obsahu difúzního vodíku.
- Přesměrovat působení tahových napětí změnou tvaru spoje.
- Použít polštářování na ploše, kde působí kolmá tahová napětí.
- Použít techniky svařování, které minimalizují napětí od svařování [19].

2.6.10 Podnávarové trhliny a zamezení jejich vzniku

Vznikem případných podnávarových trhlin může dojít k havárii armatury, trhlina se šíří přes návar a tím dojde k odloupenutí a destrukci návaru nebo se šíří do základního materiálu, čímž se narušuje těsnost armatury a rovněž je to nežádoucí situace, která může vést ke zničení části armatury a nenávratným škodám v systému, kde je armatura instalována.

Pro eliminaci tohoto problému je nutné zajištění a dodržování správných svařovacích parametrů, použití dvojvrstvého návaru v kombinaci s optimalizací svařovacích parametrů jednotlivých vrstev [20]. Dále je nutné použití vhodných metod nedestruktivních a popř. i destruktivních kontrol.

2.7 Volba způsobu navařování

Ve společnosti AG lze provádět navařování různými technologiemi. Proto před určením metody navařování pro těsnící plochy šoupátka S43 je nutno posoudit několik kritérií. Jedná se zejména o:

- Velikost a tvar dílu, resp. navařované plochy.
- Strojní vybavení firmy.
- Celková pracnost, tj. jak pracnost navařování, tak i pracnost přípravy, možnost nebo nutnost rovnání, obrábění a tepelného zpracování.
- Spotřeba elektrické energie, plynů, chladících a formovacích hmot.
- Tloušťka návaru.

- Přístupnost k navařovanému místu.
- Druh zvoleného přídavného materiálu, často určuje i způsob navařování.
- Závar, tj. hloubka natavení základního materiálu a promísení s návarovým kovem.
- Ekonomická a ekologická hlediska [22, 27].

Po posouzení všech kritérií byla pro navařování těsnících ploch šoupátek S43 vybrána technologie navařování plazmovým obloukem s přídavným materiálem ve formě prášku.

2.7.1 Charakteristika navařování plazmovým obloukem s přídavným materiálem ve formě prášku

Speciálním případem v oblasti aplikace plazmatu je navařování práškových přídavných materiálů metodou plazmového navařování s převedeným obloukem (dále jen PTA – Plasma Transferred Arc), které patří mezi nejmodernější technologie navařování. Ve světě je metoda značně rozšířena. Spolu se speciálními přídavnými materiály, které jsou odolné proti intenzivnímu opotřebení, korozi, tepelnému a rázovému zatížení, se využívá k navařování funkčních ploch o vysoké spolehlivosti. U této aplikace je plazmový oblouk stabilizovaný a působí jako koncentrovaný zdroj energie [53, 55].

Termín plazma je dnes užíván ve více oborech s odlišným významem. Zde označuje určitou formu disociovaného a vysoce ionizovaného plynu umožňující hoření elektrického oblouku. Koncentrovaný sloupec tohoto plazmového media vzniká stabilizací elektrického oblouku průchodem chlazenou tryskou. Na vnitřním povrchu stěn trysky pak dochází k rekombinaci ionizovaných částic. Tím se jádro sloupce silně přehřívá a vznikající úzký sloupec plazmového oblouku se projevuje svými specifickými vlastnostmi – vysoce zkoncentrovanou energií a axiální dynamickou složkou [3].

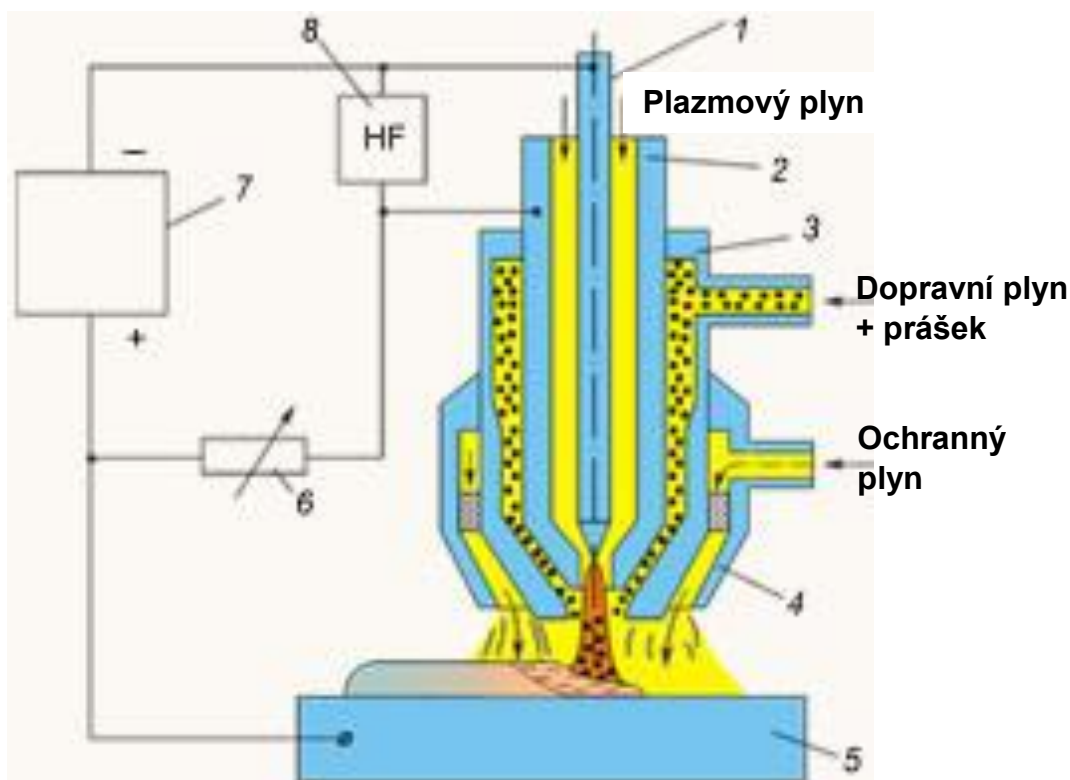
Podstatou metody PTA je elektrický oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a navařovaným materiálem, při kterém vzniká z přiváděného plynu proud vysoce koncentrované plazmy o vysoké teplotě.

V hořáku je plazmový oblouk zapálen vysokofrekvenčně na měděnou dýzu, která pomáhá zvyšovat napětí. Tento pomocný (pilotní) oblouk je napájený buď ze zvláštního zdroje, anebo přes předřadný odpor. Po přeskoku pilotního oblouku na základní materiál se zapaluje hlavní (převedený) elektrický oblouk na rozhraní wolframové elektrody, který je částečně upravený – je zúžený plazmovou tvořící tryskou, čímž se zvyšuje teplota a koncentrace.

Vhodný návarový prášek je přiváděn přímo do plazmového oblouku buď působením gravitace (s podporou vibrační soustavy), anebo je unášen přiváděným plynovým mediem, které slouží jako pracovní a zároveň ochranný plyn. Zejména se jedná o argon, případně s příměsí vodíku či dusíku, pro zvýšení teploty plazmového oblouku. Proces je velmi často nazýván jako „plazmové stříkání“. Existuje velký soubor různých navařovacích prášků, včetně nekovových pro navařování nových typů vrstev, ať již ve výrobě či opravárenství. Vysoká teplota plazmového sloupce je především vhodná pro nanášení vysokotavitelných materiálů, včetně oxidů, karbidů, nitridů, boridů a dalších.

Dosažení požadovaných vlastností u návarů ulehčuje možnost volby působení intenzity plazmového oblouku, a druhu směsného plynu dopravujícího prášek a určujícího jeho výstupní rychlosti z hořáku, která pak následně způsobuje zvyšování kinetické energie letících částic nataveného prášku. Tím lze jemně doregulovat nejen množství nataveného návarového kovu, ale i jeho formování, hutnost a velikost přilnutí k navařovanému povrchu [3; 33; 51; 53, 55].

Na (Obr 2.7) je schématicky znázorněna metoda navařování PTA.



Obr. 2.7 Schéma navařování metodou PTA.: 1 Elektroda, 2 Plazmová tryska (dýza), 3 Fokusační tryska (dýza), 4 Ochranná tryska (dýza), 5 Součást, 6 Zátěžový odpor, 7 Napájecí zdroj, 8 Oscilační jednotka [53].

2.7.2 Základní výhody plazmového navařování s práškem

Mezi nejdůležitější výhody navařování metodou PTA lze uvést tyto:

- Vysoký objem navařeného kovu, až $10 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$.
- Vysoká kvalita navařeného kovu.
- Minimální ztráty výplňového materiálu.
- Lze navařovat Fe, Ni, Co, Cu slitinami, stejně jako kompozitními materiály.
- Minimální promísení se základním materiálem ($< 5 \%$).
- Zvýšení produktivity a ekonomičnosti proti klasickým mechanizovaným metodám navařování v ochranném plynu nebo pod tavidlem.
- Značná úspora navařovacích materiálů.

- Minimální deformace navařované součásti – díky koncentraci plazmy je oblast tavení poměrně úzká a tím se minimalizuje tepelné ovlivnění základního materiálu.
- Snížení nákladů na opracování návarů vzhledem k rovnoměrnosti a přesnosti navařené vrstvy. Rozměry návaru lze udržet v toleranci 0,5 mm.
- Minimalizace vlivu lidského činitele na proces navařování a podstatné snížení vad návarů. Zvýšení hygieny, bezpečnosti a celkové úrovně práce.

V konkurenci s laserovou technologií navařování PTA nabízí mnohem vyšší produktivitu, srovnatelně vysokou kvalitu nanesených vrstev a podstatně nižší náklady [51; 53].

2.8 Přídavné materiály

Provozní podmínky navařovaných strojních součástí mohou být velmi specifické, a proto se na návarové přídavné materiály kladou takové požadavky, že jejich vlastnosti musí vyhovovat podmínkám provozu [24].

Po zvážení všech provozních podmínek byl jako přídavný materiál zvolen prášek na bázi kobaltu, s obchodním označením Stellite 6.

2.8.1 Přídavný materiál na bázi kobaltu – Stellite 6

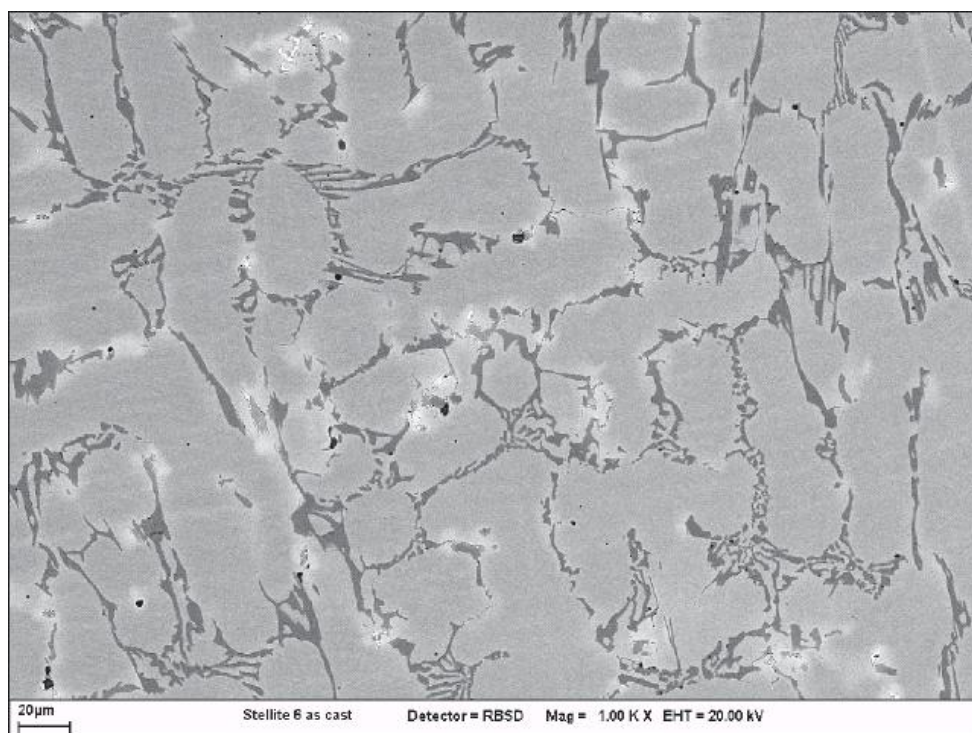
Stellite 6 je v oblasti slitin Co-Cr-W-C nejpoužívanější slitinou. Má vynikající odolnost k různým formám opotřebení, proti korozi, oděru, teplotním rázům a kavitační erozi. Zachovává si dostatečný stupeň tvrdosti do 500°C a odolává oxidaci do 1095°C. Tyto vlastnosti jsou dány díky jedinečnému charakteru pevné karbidové fáze, rozptýlené v základní matici, tvořené Co-Cr. Návar může být opracován nástroji ze slinutých karbidů.

Slitina má kavitačně-erozní odolnost desetkrát vyšší než nerezová ocel SS 304. Je také deset-krát více odolnější než nerezové oceli 304 nebo 1020 při odírání za nízkého napětí a nejméně dvakrát odolnější než kalená ocel 1090 (Rc55). Stellite 6 je odolný oxidickým kyselinám, jako např. octová, mravenčí,

fosforečná a sírová o nízké koncentraci, ale nedoporučuje se pro silně redukční kyseliny, jako je chlorovodíková, dále chloridové roztoky a mořskou vodu.

Využití Stellite 6 je na součástech armatur a čerpadel, lopatkách turbín. Dále se používá na hřídele, ložiska, ochranné prvky proti erozi, pouzdra, objímky, nátrubky, vložky, pánve, nože, škrabky, hřebel, protlačovací nástroje a jiné [45; 56].

Na (Obr. 2.8) je zobrazena slitina Stellite 6 pod elektronovým mikroskopem při tisícinásobném zvětšení.



Obr. 2.8 Snímek Stellite 6 pořízený elektronovým mikroskopem, zvětšeno 1000× [45].

2.8.2 Výběr konkrétního přídavného materiálu

Pro výběr vhodného přídavného prášku bylo ve firmě AG využito nabídek 3 významných společností, které se pohybují na trhu ve výrobě přídavných prášků pro navařování metodou PTA a následně vybrán konkrétní přídavný prášek. Jednalo se o produkty z následujících firem:

- Deloro Stellite Inc.
- Böhler Welding Group.
- Castolin Eutectic Group.

Chemické složení a dosahovaná tvrdost dle dostupných údajů jednotlivých výrobců jsou uvedeny v (Tab. 2.5).

Tab. 2.5 Chemické složení a vlastnosti Stellite 6 od tří výrobců [42; 43; 45, 56;].

Chemické složení [hm. %]	Deloro Stellite Inc.	Böhler Welding Group	Castolin Eutectic Group
C	1,2	1	1,1
Fe	2	1	
W	4,5	4	4,5
Si	1	1	
Ni	2	2	
Cr	29	29	28
Co	Základ	Základ	Základ
Dosahovaná tvrdost [HRC]	min. 37	41	~40

Po zvážení všech možností byl nakonec vybrán přídavný materiál firmy Castolin Eutectic Group s označením EuTroLoy 16 006, jehož atest je uveden v Příloze č. 1.

2.9 Navařovací automat PPC 250 PTM

Experimentální část, tj. navařování zkušebních vzorků a následné navařování na těsnící plochy armatur je prováděna na navařovacím plazmovém automatu PPC 250 PTM firmy KSK Česká Třebová.

Automat je určen k plazmovému navařování metodou PTA s práškem na rotační díly z čela a na obvodu, jako jsou např. sedla, klíny, talíře, kuželky a další součásti průmyslových armatur. Dále lze navařovat plochy nerotační a vnitřní válcové plochy [58]. Na (Obr. 2.9) je tento navařovací automat zobrazen.



Obr. 2.9 Plazmový navařovací automat PPC 250 PTM [58].

Stroj je kompaktní, všechny díly jsou umístěny na základové desce. Skládá se z následujících základních komponent:

- Polohovací systém hořáku se třemi řízenými osami (X, Y, Z).
- Polohovadlo s naklápěním (řízené osy C a R).
- Řídicí systém.
- Ovládací panel.
- Zdroje pro plazmový hořák.
- Chladicí jednotka plazmového hořáku.
- Podavač prášku.
- Plazmový hořák PHP 250 S.

Volitelně lze dále doplnit druhým podavačem prášku, podavačem drátu, zdrojem pro horký drát a dalšími plazmovými hořáky [58] údaje stroje jsou uvedeny v Příloze č. 2

3 Návrh postupu navařování spolu s návrhem kontrol návarů dle platných norem

3.1 Tvorba postupu navařování

Během schvalování procesu navařování do výrobního procesu je nejprve vytvořen dokument pWPS - *preliminary Welding Procedure Specification*, což je předběžná specifikace postupu navařování, která má být schvalována [52]. V tomto případě se dokument týká zkušebních vzorků s návary, které reprezentují těsnící plochy armatury. Po navařování procházejí tyto vzorky sérií nedestruktivního i destruktivního zkoušení a v případě úspěšných výsledků zkoušek je vystaven dokument WPQR - *Welding Procedure Qualification Record*, který schvaluje postup navařování a zahrnuje všechny nezbytné údaje, potřebné pro kvalifikaci předběžné specifikace postupu navařování [52].

Na základě WPQR je vystaven dokument WPS - *Welding Procedure Specification*, což je specifikace navařovacího postupu. Popisuje schválený postup navařování a plně nahrazuje Technologický list [52]. V tomto případě budou dokumenty specifikovat navařování těsnících ploch šoupátek metodou PTA 152 dle ČSN EN ISO 4063, pomocí přídavného materiálu ve formě prášku.

Bližší informace o tvorbě dokumentu WPS jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 1560 – 1 [5] a údaje o tvorbě dokumentu WPQR v normě ČSN EN ISO 15614 – 7 [6].

3.2 Kvalifikace postupu navařování těsnících ploch šoupátka S43

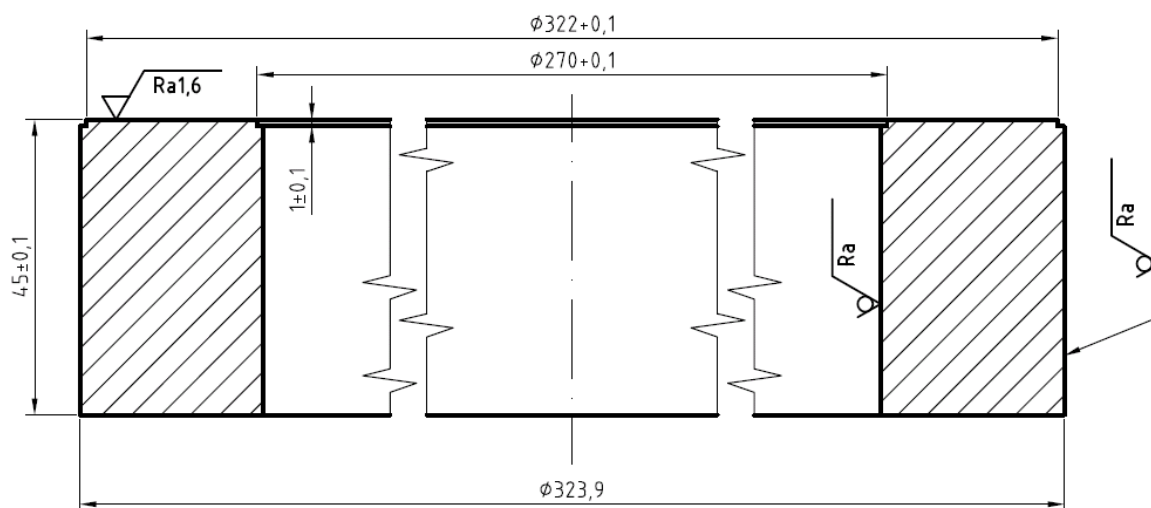
Stanovení a kvalifikace postupu navařování je pro navařování těsnících ploch šoupátka S43 prováděno dle ČSN EN ISO 15614 – 7: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 7: Navařování [6].

Pro kvalifikaci postupu navařování se musí zkušební vzorek navařovat stejnými metodami navařování, jaké se budou používat ve výrobě. Zkouška postupu navařování se provádí na normalizovaném zkušebním vzorku. Použitý základní materiál musí reprezentovat materiály, které se budou navařovat ve výrobě.

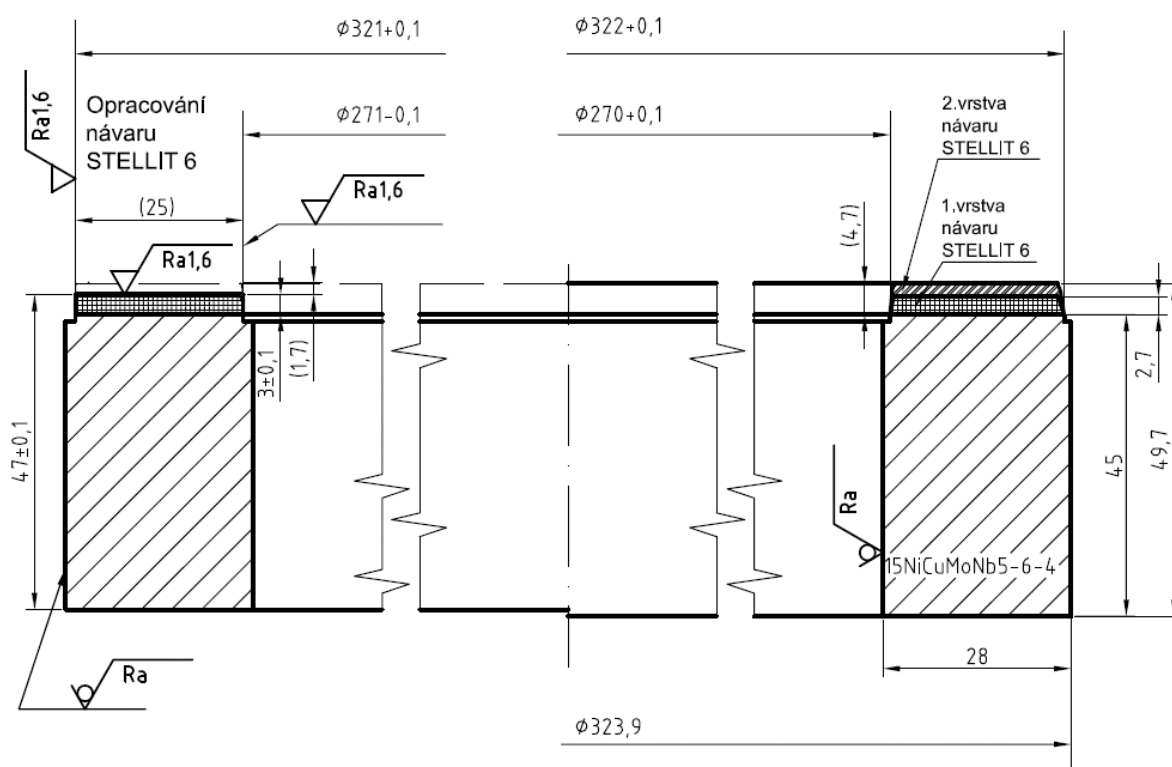
Příprava a navařování zkušebních vzorků musí být provedeny dle pWPS a za všeobecných výrobních podmínek, které musí reprezentovat. Navařování a zkoušení zkušební vzorku musí být osvědčeno zkušebním orgánem nebo zkušební organizací [6].

3.3 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky jsou trubky vyrobené z oceli 15NiCuMoNb5-6-4 s vnějším průměrem $\varnothing = 323,9$ mm a tloušťkou stěny 28 mm. Tyto reprezentují tvarem i rozměry těsnící plochy armatury – sedla. Jejich počet je 2 ks. Na jejich čelní plochy budou navařeny 2 vrstvy tvrdokovového návaru Stellit 6. Pro variantní možnosti navařování budou mít obě zkušební tělesa různé předpokládané tloušťky návaru, jejichž velikost bude v rozmezí $h = (4 - 5)$ mm. U zkušební vzorku č. 1 by měla předpokládaná tloušťka návaru činit $h = 4,7$ mm a u zkušební vzorku č. 2 by měla tato tloušťka činit $h = 4,3$ mm. Tloušťku návaru lze regulovat na stroji změnou parametrů navařování, navařovací rychlosti a otáčkami polohovadla. Platí zde úměra, že se zvyšujícími se otáčkami a navařovací rychlostí klesá množství navařeného kovu. Pro eliminaci výrobní nepřesnosti trubky se na okraji provádí soustružení osazení s výškou 1 mm, které ohraničuje přesnou šířku návaru. Na základě informací a výrobní dokumentace společnosti AG byly v programu AutoCad nakresleny výrobní výkresy zkušebních vzorků, které jsou uvedeny v Příloze č. 3. Na (Obr. 3.1) je zobrazen zkušební vzorek s rozměry před navařováním a na (Obr. 3.2) je zobrazen zkušební vzorek č. 1 s rozměry po navařování (pravá část obrázku) a celkovými rozměry po opracování (levá část obrázku). Tloušťka čistého návaru po finálním opracování má činit 3 mm a sestává se z obou vrstev navařovaného kovu.



Obr. 3.1 Zkušební vzorek s rozměry před navařováním



Obr. 3.2 Zkušební vzorek s rozměry po navařování (pravá část obrázku) a celkovými rozměry po opracování (levá část obrázku).

3.3.1 Rámcový technologický postup výroby zkušebních vzorků

Na základě výkresů zkušebních vzorků byl zpracován rámcový technologický postup jejich výroby:

1. Nařezat materiál s přídávkem na opracování.
2. Opracovat součást, opracovat návarové plochy.
3. Kontrola rozměrů po opracování, výsledky zapsat do Náměrového listu.
4. Penetrační zkouška plochy určené pro návar dle ČSN EN 571, vyhodnocení přípustnosti vad – bez trhlin.
5. Předehřev součásti.
6. Navaření 1. vrstvy Stellite 6, mechanické očištění, vizuální kontrola, kontrola teploty Interpass.
7. Navaření 2. vrstvy Stellite 6, mechanické očištění, vizuální kontrola. Po navaření provést kontrolu tloušťky návaru – výšky zkušební vzorku (před vložením do pece).
8. Tepelné zpracování – žíhání.
9. Opracování zkušební vzorku načisto.
10. Kontrola finálních rozměrů dle výkresu. Výsledky zapsat do náměrového listu.
11. Nedestruktivní kontrola ve společnosti AG: vizuální kontrola, penetrační zkouška, ultrazvuková zkouška, kontrola tvrdosti na šesti místech obvodu, kontrola chemického složení na čtyřech místech obvodu.
12. Provedení řezů pro destruktivní zkoušení ve společnosti VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o.
13. Provedení zkoušek materiálu společnosti VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o., a vyhodnocení výsledků.

3.4 Parametry pro navařování zkušebních vzorků, vztažené na základní materiál 15NiCuMoNb5-6-4

V rámci tvorby dokumentů pWPS pro oba zkušební vzorky je nutno provést pro část: „Parametry navařování“ tyto výpočty: Výpočet ekvivalentního uhlíku, vneseného tepla, rychlosti navařování a teploty předehřevu. Dále je nutno stanovit velikost teploty Interpass a teploty tepelného zpracování. Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v pWPS pro oba zkušební vzorky, s označením 7R-1268 a tyto jsou uvedeny v Příloze č. 4. Výpočty jsou prováděny takovou formou, aby je bylo možno dále použít pro navařování různých velikostí těsnících ploch šoupátek s konkrétními parametry a chemickým složením.

3.5 Výpočet ekvivalentního uhlíku

Vliv chemického složení oceli na svařitelnost lze vyjádřit ekvivalentem uhlíku C_E . Je to příspěvek jednotlivých legur ke kalitelnosti oceli. Čím snadněji se ocel zakalí, tím roste nebezpečí vzniku zakalených struktur, které jsou křehké (martenzit, spodní bainit) ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné zóně svarového spoje, a díky tomu se obtížněji ocel svařuje. Čím je tedy hodnota C_E vyšší, tím hůře se daná ocel svařuje [20].

3.5.1 Výpočet dle vzorce Mezinárodního svářečského institutu (IIW)

Omezení rovnice: platí do max. obsahu chemických prvků v [hm. %]: C = 0,25%; Si = 0,8%; Mn = 1,7%; Cr = 0,9%; Cu = 1%; Ni = 2,5%; Mo = 0,75%; V = 0,2% [20]. Tato rovnice je v daném chemickém složení použitelná. Výpočetní vztah dle [20]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (4)$$

Kde: CEUhlíkový ekvivalent dle IIW [hm. %]

Výpočet hodnoty CE dle (4):

$$CE = 0,17 + \frac{1,2}{6} + \frac{0,3 + 0,5}{5} + \frac{1,3 + 0,8}{15}$$

$$CE = 0,67 \text{ hm. \%}$$

Hodnota ekvivalentního uhlíku dle vzorce Mezinárodního svářečského institutu (IIW) činí $CE = 0,67 \text{ hm. \%}$.

3.5.2 Výpočet dle ČSN EN 1011 – 2

Omezení rovnice: pro oceli skupin 1 až 4 dle TNI CEN ISO/TR 15608 [8]. Základní materiál je zařazen do třídy 4.2 [48]. Z tohoto hlediska je metoda použitelná. Další omezení se týká obsahu legujících prvků v [hm %]: C = (0,05 až 0,25)%; Mn = (0,5 až 1,9)% a maximální hodnoty těchto prvků: Si = 0,8%; Cr = 1,5%; Cu = 0,7%; Ni = 2,5%; Mo = 0,75%; Ti = 0,12%; V = 0,18%; B = 0,005%; Nb = 0,06% [20]. Metoda je i z hlediska chemického složení použitelná.

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (5)$$

Kde: CET uhlíkový ekvivalent dle ČSN EN 1011 – 2 [hm. %]

Výpočet hodnoty CET dle (5):

$$CET = 0,17 + \frac{1,2 + 0,5}{10} + \frac{0,3 + 0,8}{20} + \frac{1,3}{40}$$

$$CET = 0,43 \text{ hm. \%}$$

3.5.3 Zhodnocení výpočtu uhlíkového ekvivalentu

Nyní jsou výsledkem 2 hodnoty: $CE = 0,67 \text{ hm. \%}$ a $CET = 0,43 \text{ hm. \%}$.

Je-li hodnota uhlíkového ekvivalentu $\leq 0,45 \text{ hm. \%}$ a zároveň platí, že $C \leq 0,20 \text{ hm. \%}$ a svařovaná tloušťka je $\leq 25 \text{ mm}$, nejsou nutné při svařování žádná zvláštní opatření. Není-li splněna některá z podmínek, je nutné použít zvláštní opatření, aby se zamezilo vzniku trhlin. K těmto opatřením patří zejména přehřev [57].

Ve skutečnosti je tloušťka zkušebních těles rovna 45 mm bez návaru a obsah uhlíku v oceli je $C = 0,17 \text{ hm.}\%$. Kritérium maximální hodnoty uhlíku v oceli je splněno, ale není splněno kritérium maximální tloušťky materiálu. Rovněž není splněno omezení uhlíkovým ekvivalentem, který má maximální hodnotu 0,45 hm.%. V prvním případě výpočtu je rozdíl 0,22 hm.% vůči maximu. Ve druhém případě je sice tato podmínka výpočtu splněna, ale do maximální hodnoty chybí pouze 0,02 hm.%. Závěrem je nutno konstatovat, že při svařování je nutné použití zvláštních opatření, zahrnujících přehřev oceli.

3.6 Výpočet rychlosti navařování

Rychlost navařování v je rovna vektorovému součtu dvou dílčích rychlostí a to rychlosti pendlu hořáku v_1 a obvodové rychlosti otáčení polohovadla v_2 .

Rychlost pendlu hořáku v_1 lze vypočíst dle vztahu:

$$v_1 = f \cdot a \quad (6)$$

Kde: v_1 rychlost pendlu hořáku [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

ffrekvence kyvů hořáku [s^{-1}]

arozkyv hořáku [mm]

Frekvence kyvů hořáku byla pro oba zkušební vzorky zvolena na hodnotu $f = 40 \text{ min}^{-1}$ (pro nastavení na stroji), což je rovno hodnotě $f = \frac{2}{3} \text{ s}^{-1}$. Rozkyv hořáku byl zvolen na hodnotu $a = 20 \text{ mm}$.

Výpočet rychlosti pendlu hořáku v_1 dle (7):

$$v_1 = \frac{2}{3} \cdot 20$$

$$v_1 = 13,33 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost pendlu hořáku je rovna $v_1 = 13,33 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Rychlost otáčení polohovadla v_2 lze vypočítat dle vztahu:

$$v_2 = \omega \cdot r \quad (7)$$

Kde: v_2 obvodová rychlost polohovadla [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

ω úhlová rychlost otáčení polohovadla [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

r poloměr zkušební vzorku [mm]

V tomto případě mají zkušební vzorky tvar mezikruží, tudíž hodnota poloměru r není konstantní, ale proměnná. Pro zjednodušení je brána střední hodnota, která činí u obou zkušebních vzorků $r = 296 \text{ mm}$.

Úhlová rychlost otáčení polohovadla ω se počítá dle vztahu:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n \quad (8)$$

Kde: ω úhlová rychlost otáčení polohovadla [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

π Ludolfovo číslo (3,1415 [-])

n otáčky polohovadla [s^{-1}]

Otáčky polohovadla byly zvoleny pro zkušební vzorek č. 1: $n_1 = 0,04 \text{ min}^{-1}$ (pro nastavení na stroji), což je rovno hodnotě $n_1 = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Pro zkušební vzorek č. 2: $n_2 = 0,06 \text{ min}^{-1}$ (pro nastavení na stroji), což je rovno hodnotě $n_2 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Výpočet úhlové rychlosti otáčení polohovadla ω_1 pro zkušební vzorek č. 1 a úhlové rychlosti polohovadla ω_2 pro zkušební vzorek č. 2 dle (8):

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1$$

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot n_2$$

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 6,6 \cdot 10^{-4}$$

$$\omega_2 = 2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 10^{-3}$$

$$\omega_1 = 4,14 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\omega_2 = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet obvodové rychlosti otáčení polohovadla v_{2-1} pro zkušební vzorek č. 1 a v_{2-2} pro zkušební vzorek č. 2 dle (7):

$$v_{2-1} = \omega_1 \cdot r$$

$$v_{2-2} = \omega_2 \cdot r$$

$$v_{2-1} = 4,14 \cdot 10^{-3} \cdot 296$$

$$v_{2-2} = 6,28 \cdot 10^{-3} \cdot 296$$

$$v_{2-1} = 1,22 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_{2-2} = 1,85 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet celkové rychlosti navařování v se počítá dle vztahu:

$$v_c = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (9)$$

Kde: v_crychlost navařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_1 rychlost pendlu hořáku [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_2 obvodová rychlost otáčení polohovadla [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Výpočet rychlosti navařování v_{c-1} pro zkušební vzorek č. 1 a v_{c-2} pro zkušební vzorek č. 2 dle (9):

$$\begin{aligned} v_{c-1} &= \sqrt{v_1^2 + v_{2-1}^2} & v_{c-2} &= \sqrt{v_1^2 + v_{2-2}^2} \\ v_{c-1} &= \sqrt{13,33^2 + 1,22^2} & v_{c-2} &= \sqrt{17,33^2 + 1,85^2} \\ v_{c-1} &= 13,39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} & v_{c-2} &= 13,46 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Výsledné hodnoty rychlostí navařování jsou rovny:

- Pro zkušební vzorek č. 1 : $v_{c-1} = 13,39 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Pro zkušební vzorek č. 2 : $v_{c-2} = 13,46 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.7 Výpočet tepelného příkonu:

Tepelný příkon Q se vypočítá dle ČSN EN 1011 – 1. Tento vztah byl převzat do [20]. Tepelný příkon je počítán pro obě zkušební tělesa, neboť pro navařování jsou použity jiné parametry.

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (10)$$

Kde: Qmnožství tepla přivedeného do návaru na jednotku jeho délky [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

kkoeficient metody tepelné účinnosti svařování (navarování) [–]

Unapětí při navařování [V]

Iintenzita svařovacího proudu [A]

vrychlost navařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

Koeficient metody tepelné účinnosti svařování pro metody plazmového svařování (navarování) činí $k = 0,6 [-]$, dle [20].

Napětí při svařování je voleno pro zkušební vzorek č. 1: $U_1 = 20 \text{ V}$, pro zkušební vzorek č. 2: $U_2 = 21 \text{ V}$.

Intenzita svařovacího proudu je volena pro zkušební vzorek č. 1: $I_1 = 115 \text{ A}$, pro zkušební vzorek č. 2: $I_2 = 120 \text{ A}$.

Výpočet hodnoty tepelného příkonu Q_1 pro zkušební vzorek č. 1 a Q_2 pro zkušební vzorek č. 2 dle (10):

$$\begin{aligned} Q_1 &= k \cdot \frac{U_1 \cdot I_1}{V_{c-1}} \cdot 10^{-3} & Q_2 &= k \cdot \frac{U_2 \cdot I_2}{V_{c-2}} \cdot 10^{-3} \\ Q_1 &= 0,6 \cdot \frac{20 \cdot 115}{13,39} \cdot 10^{-3} & Q_2 &= 0,6 \cdot \frac{21 \cdot 120}{13,46} \cdot 10^{-3} \\ Q_1 &= 0,103 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} & Q_2 &= 0,112 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \end{aligned}$$

Výsledné hodnoty tepelného příkonu jsou rovny :

- Pro zkušební vzorek č. 1: $Q_1 = 0,103 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$.
- Pro zkušební vzorek č. 2: $Q_2 = 0,112 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$.

3.8 Výpočet teploty předehřevu

Použitím předehřevu se snižuje riziko vodíkového praskání, ochlazovací rychlost a tím i vnitřní pnutí ve spoji a tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti [46].

3.8.1 Výpočet teploty předehřevu dle Seferiána

Algoritmus je vhodný pro uhlíkové a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku od 0,1 hm. %. [8] V tomto případě je metoda použitelná. Výpočetní vztahy dle [20].

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \quad (11)$$

Kde: T_p teplota předehřevu [$^{\circ}\text{C}$]

$$C_P = C_C + C_S \quad (12)$$

Kde: C_C ekvivalentní uhlík [hm. %]

$$C_C = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \quad (13)$$

$$C_S = 0,005 \cdot s \cdot C_C \quad (14)$$

Kde: s tloušťka materiálu [mm]

Tloušťka s obou zkušebních těles činí 45 mm

Výpočet hodnoty C_P dle (12) po dosazení výsledných hodnot ekvivalentního uhlíku C_C dle (13) a hodnoty C_S dle (14):

$$C_C = \frac{360 \cdot 0,17 + 40 \cdot (1,2 + 0,3) + 20 \cdot 1,3 + 28 \cdot 0,5}{360} = 0,4477 \text{ hm. \%}$$

$$C_S = 0,005 \cdot 45 \cdot 0,4477 = 0,1007 \text{ [-]}$$

$$C_P = 0,4477 + 0,1007 = 0,5484 \text{ hm. \%}$$

Výpočet teploty přehřevu T_P dle (11):

$$T_P = 350 \cdot \sqrt{0,5484 - 0,25}$$

$$T_P = 191^\circ \text{C}$$

Teplota přehřevu dle Seferiána činí: $T_P = 191^\circ \text{C}$.

Výsledek výpočtu lze považovat za nejmenší možnou hodnotu přehřevu, neboť tento v sobě zahrnuje jen parametry chemického složení a tloušťku materiálu.

3.8.2 Výpočet teploty přehřevu dle ČSN EN 1011 – 2 metoda B

Omezení metody: materiál musí spadat do skupiny 1 až 4 dle TNI CEN ISO/TR 15608 a musí být splněny podmínky pro výpočet ekvivalentního uhlíku *CET*. [20] Základní materiál patří do skupiny ocelí ozn. 4.2 [48]. Ekvivalentní uhlík *CET* byl vypočten v kap. 3.5.2 Výpočet dle ČSN EN 1011 – 2, dle rovnice (5). Obě podmínky jsou splněny, metoda je dále použitelná. Výpočetní vztahy převzaty z [20]. Metoda v sobě zahrnuje vlivy:

Vliv chemického složení oceli:

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad (15)$$

Kde: T_{pCET} parametr teploty předehřevu zahrnující vliv chemického složení [°C]

CET uhlíkový ekvivalent [hm. %]

Vliv obsahu difúzního vodíku ve svarovém spoji:

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \quad (16)$$

Kde: T_{pHD} parametr teploty předehřevu zahrnující vliv obsahu difúzního vodíku [°C]

HD obsah difúzního vodíku ve svarovém kovu [ml · 100g⁻¹]

Vliv tloušťky svařovaných materiálů:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad (17)$$

Kde: T_{pd} parametr teploty předehřevu zahrnující tloušťku svařovaných materiálů [°C]

d tloušťka svařovaných materiálů [mm]

Vliv tepelného příkonu:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad (18)$$

Kde: T_{pQ} parametr teploty předehřevu zahrnující vliv tepelného příkonu [°C]

Q tepelný příkon [kJ·mm⁻¹]

Teplotu předehřevu T_p je možno vypočítat jako součet příspěvků jednotlivých parametrů k teplotě předehřevu:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad (19)$$

Kde: T_p teplota předehřevu [°C]

Výpočet parametru teploty předehřevu T_{pCET} , zahrnujícího vliv chemického složení dle (15):

Velikost hodnoty CET činí: $CET = 0,43$ hm.%.

$$T_{pCET} = 750 \cdot 0,43 - 150$$

$$T_{pCET} = 172,5^{\circ}\text{C}$$

Výpočet parametru teploty předehřevu T_{pHD} , zahrnujícího vliv obsahu difúzního vodíku dle (16):

Hodnota HD byla zvolena: $HD = 10 \text{ ml} \cdot 100\text{g}^{-1}$

$$T_{pHD} = 62 \cdot 10^{0,35} - 100$$

$$T_{pHD} = 39^{\circ}\text{C}$$

Výpočet parametru teploty předehřevu T_{pd} , zahrnujícího tloušťku svařovaných materiálů dle (17):

Tloušťka d obou zkušebních těles činí 45 mm.

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{45}{35}\right) - 110$$

$$T_{pd} = 34^{\circ}\text{C}$$

Výpočet parametru teploty předehřevu T_{pQ-1} , zahrnující vliv tepelného příkonu pro zkušební vzorek č. 1 a parametru teploty předehřevu T_{pQ-2} , zahrnující vliv tepelného příkonu pro zkušební vzorek č. 2 dle (18):

$$T_{pQ-1} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q_1 - 53 \cdot CET + 32$$

$$T_{pQ-2} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q_2 - 53 \cdot CET + 32$$

$$T_{pQ-1} = (53 \cdot 0,43 - 32) \cdot 0,103 - 53 \cdot 0,43 + 32$$

$$T_{pQ-2} = (53 \cdot 0,43 - 32) \cdot 0,112 - 53 \cdot 0,43 + 32$$

$$T_{pQ-1} = 8,26^{\circ}\text{C}$$

$$T_{pQ-2} = 8,17^{\circ}\text{C}$$

Z výsledků obou hodnot parametrů teploty předehřevu T_{pQ} je patrné, že i přes odlišné parametry se výsledné příspěvky prakticky neliší. Pro výpočet předehřevu je proto použita jen jedna hodnota $T_{pQ} = 8,3^{\circ}\text{C}$

Výpočet teploty předehřevu T_p dle (19):

$$T_p = T_{pCET} + T_{pHD} + T_{pd} + T_{pQ}$$

$$T_p = 172,5 + 39 + 34 + 8,3$$

$$T_p = 253,8^\circ\text{C}$$

Na základě výpočtů teploty předehřevu dle ČSN EN 1011 – 2 metoda B byla výsledná teplota předehřevu zvolena na hodnotu $T_p = 250^\circ\text{C}$.

3.9 Výpočet teplot tepelného zpracování

Svary a návary se tepelně zpracovávají pro:

- Snížení zbytkových napětí.
- Zlepšení vlastností spoje (struktury, mech. vlastností, tvrdosti apod.).
- Snížení rizika vzniku zbrzděných lomů.
- Snížení obsahu difúzního vodíku ve spoji.
- Zlepšení rozměrové stability svařované konstrukce [20].

3.9.1 Volba tepelného zpracování – žíhání na snížení vnitřního pnutí

Z důvodu zabránění možného odloupení návaru a současně kvůli snížení zbytkových napětí bylo jako tepelné zpracování po navařování zvoleno žíhání na snížení vnitřních pnutí. Základní parametry žíhání:

- Rychlost ohřevu na žíhací teplotu.
- Žíhací teplota.
- Doba výdrže na žíhací teplotě.
- Rychlost ochlazování z žíhací teploty [20].

Výsledná teplota pro žíhání na snížení vnitřního pnutí musí být pod hodnotou teploty A_{c1} a obvykle bývá v rozpětí $(550 - 650)^\circ\text{C}$ [20].

Vzhledem k tloušťce daných zkušebních vzorků byla zvolena teplota žíhání 630°C . Žíhací pec je obvykle zahřáta na teplotu předehřevu, což je v tomto případě 250°C .

Pro stanovení rychlosti ohřevu a ochlazování při tepelném zpracování svařovaných konstrukcí z nelegovaných, mikrolegovaných a nízkolegovaných ocelí doporučuje norma ČSN 05 0211 [4] tyto vztahy:

Rychlost ohřevu v_h :

$$v_h \leq \frac{5000}{h} \text{ ale současně platí: } 50 \leq v_h \leq 250 \quad (20)$$

Kde: v_h rychlost ohřevu [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$]

h největší tloušťka žíhaného materiálu [mm]

Výpočet rychlosti ohřevu v_h dle (20):

$$v_h = \frac{5000}{49}$$

$$v_h = 102^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$$

Rychlost ohřevu na žíhací teplotu byla zvolena na $v_h = 100^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$.

Rychlost ochlazování v_c .

$$v_c \leq \frac{6500}{h} \text{ ale současně platí: } 50 \leq v_c \leq 250 \quad (21)$$

Kde: v_c rychlost ochlazování [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$]

h největší tloušťka žíhaného materiálu [mm]

Výpočet rychlosti ochlazování v_c dle (21):

$$v_c = \frac{6500}{49}$$

$$v_c = 132^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$$

Rychlost ochlazování v peci byla zvolena na $v_c = 130^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$, až do teploty okolí, z důvodu možného popraskání návaru.

Doba výdrže na žíhací teplotě t_v

Doba výdrže se často stanovuje podle prakticky ověřeného kritéria 4 minuty na 1mm maximální tloušťky žíhané konstrukce.

$$t_v = 4 \cdot h \quad (22)$$

Kde: t_vdoba výdrže na žíhací teplotě [min]

hnejvětší tloušťka žíhaného materiálu [mm]

Maximální tloušťka zkušebního vzorku po navaření činí $h = 49,7$ mm.

Výpočet doby výdrže na žíhací teplotě t_v dle (22):

$$t_v = 4 \cdot 49,7$$

$$t_v = 199 \text{ min.}$$

Z ekonomických důvodů a vzhledem k tomu, že se jedná o navařování, kdy byly svarové housenky aplikovány pouze na povrchu a nikoli přes průřez tělesa, tudíž spodní část tělesa není svarem ovlivněna, byla doba výdrže snížena na $t_v = 120$ min.

3.10 Určení teploty Interpass

Zjednodušeně je Interpass maximální teplota předchozí vrstvy při vícevrstevném svařování. Pokud je skutečná teplota po předehřátí nižší než požadovaná Interpass teplota, existuje reálné nebezpečí vzniku zákalné struktury v tepelně ovlivněné oblasti (dále jen TOO). Ta se stává náchylnou k praskání za studena. Při příliš vysoké teplotě oproti předepsané Interpass teplotě dochází v TOO k růstu velikosti zrn, což nepříznivě ovlivňuje výslednou pevnost svarového spoje. Nejjednodušší je měřit Interpass teplotu pomocí tavných kříd. Při svařování první vrstvy je u materiálů, které to vyžadují, nutné provést předehřev právě na teplotu Interpass. Při dalších vrstvách buď už stačí vnesené teplo na udržení potřebné teploty pro svařování, nebo je ještě nutný další dohřev. Pokud je ale skutečná teplota vyšší, než předepsaný Interpass, je někdy nutné počkat na zchladnutí [59].

Jelikož se v tomto případě jedná o dvouvrstvé navařování nízkolegované oceli, je nutné předepisovat tuto teplotu. Tato teplota byla stanovena na min. 200°C. Hodnota byla odečtena z ARA diagramu oceli 15NiCuMoNb5-6-4 v kap. 2.5.5 Mechanické vlastnosti, dle (Obr. 2.6). a ověřena výpočtem – jedná se o hodnotu M_f ARA diagramu. Horní omezení této teploty určuje hodnota M_s ARA diagramu.

Výpočtem a ověřením v ARA diagramu byla maximální hodnota teploty Interpass z praktických důvodů stanovena na 300°C. Výpočetní vztahy byly převzaty z [15].

Výpočet teploty M_f :

$$M_f = 346 - 474 \cdot C - 33 \cdot Mn - 17 \cdot Ni - 17 \cdot Cr - 21 \cdot Mo \quad (23)$$

Kde: M_fteplota počátku martenzitické přeměny [°C]

Výpočet teploty M_f dle (23):

$$\begin{aligned} M_f &= 346 - 474 \cdot 0,17 - 33 \cdot 1,2 - 17 \cdot 1,3 - 17 \cdot 0,3 - 21 \cdot 0,5 \\ M_f &= 188^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Výpočet teploty M_s :

$$M_s = 500 - 300 \cdot C - 35 \cdot Mn - 20 \cdot Cr - 15 \cdot Ni - 10 \cdot Si - 10 \cdot Mo \quad (24)$$

Kde: M_s teplota konce martenzitické přeměny [°C]

Výpočet teploty M_f dle (24):

$$\begin{aligned} M_s &= 500 - 300 \cdot 0,17 - 35 \cdot 1,2 - 20 \cdot 0,3 - 15 \cdot 1,3 - 10 \cdot 0,5 - 10 \cdot 0,5 \\ M_s &= 371^\circ\text{C} \end{aligned}$$

3.11 Návrh kontrol návarů dle platných norem

Kontroly a zkoušení návarů vychází z normy ČSN EN ISO 15 614 – 7 [6]. Dle Tabulky 1 této normy jsou pro tvrdokovové návary, do nichž lze slitinu Stellite 6 zařadit, požadovány tyto zkoušky:

- Vizuální kontrola (rozsah zkoušení: 100%).
- Zkouška na povrchové trhliny (rozsah zkoušení: 100%).
- Kontrola makrostruktury (rozsah zkoušení: 1 vzorek).
- Zkouška tvrdosti (rozsah zkoušení: 1 vzorek).
- Kontrola mikrostruktury (rozsah zkoušení: 1 vzorek) [6].

U zkoušky na povrchové trhliny je možno použít kapilární nebo magnetickou práškovou zkoušku. Pro nemagnetické materiály kapilární zkoušku [6]. V tomto případě bude použita zkouška kapilární.

Kromě těchto předepsaných zkoušek budou na základě požadavku společnosti AG ještě provedeny zkoušky ultrazvuková s rozsahem zkoušení 100% a chemický rozbor s rozsahem zkoušení 1 vzorek, pro zjištění závislosti chemického složení na tloušťce návaru a závislosti chemického složení na tvrdosti návaru tak, aby bylo možno určit nejmenší možnou tloušťku návaru, která ještě vykazuje přípustné výsledné hodnoty.

3.11.1 Nedestruktivní zkoušení

Všechna nedestruktivní zkoušení musí být provedena na zkušebních kusech před jejich rozřezáním na zkušební vzorky. Všechna stanovená tepelná zpracování po svařování musí být dokončena před nedestruktivním zkoušením [6].

V závislosti na geometrii návaru, v materiálech a výrobní specifikaci, musí být provedeno nedestruktivní zkoušení (dále jen NDT) dle [6] takto:

- Vizuální kontrola dle ISO 17637*.
- Kapilární zkoušení dle ISO 3452*.
- Ultrazvuková zkouška dle ISO17640*

3.11.2 Kritéria přípustnosti u nedestruktivního zkoušení:

Vizuální kontrola: Nejsou přípustné trhliny a jiné rovinné vady. V případě navařování kobaltových slitin mohou být přípustné malé jednotlivé trhliny. Povrchové póry ≤ 2 mm jsou přípustné, pokud není jinak stanoveno (například pro závažné korozní podmínky) [6]

Zjišťování povrchových trhlin, zkoušení kapilární: Nejsou přípustné lineární indikace [6].

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků.

Ultrazvukové zkoušení: Pro toto zkoušení platí ve společnosti AG interní kritérium vyhodnocení vady, které je vůči normě ČSN EN ISO 15614 – 7 [6] čtyřikrát přísnější. Tato norma uvádí: „Jakékoliv vady, které dávají amplitudu větší než zjištěnou na vývrtnu s plochým dnem o průměru 8 mm, nejsou přípustné“ [6]. Defektoskopie používá etalon, který obsahuje simulovanou, uměle vytvořenou vadu o průměru 2 mm vytvořenou vývrtem a ukončenou plochým dnem na hranici ztavení základního materiálu a návaru tohoto etalonu.

3.11.3 Destruktivní zkoušení

Zkušební vzorky jsou odebrány až po provedení všech nedestruktivních zkoušek, které vyhověly příslušným kontrolním kritériím pro použitou metodu. Je možno je odebírat z míst kromě oblastí, které mají přípustné vady v rámci mezních hodnot přípustnosti pro použitou nedestruktivní metodu zkoušení [6].

Makroskopická a mikroskopická kontrola

Zkoušky se provádí dle ČSN EN 1321* Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Zkušební vzorek musí být naleptán a připraven na jedné straně podle ISO 17639* tak, aby byla jasně patrná hranice natavení, tepelně ovlivněná oblast a způsob kladení vrstev. Vady návarů vyhodnotit dle ČSN EN ISO 5817*.

V kontrole makrostruktury musí být zahrnut i neovlivněný základní materiál. Každá zkouška postupu musí být zdokumentována minimálně jedním snímkem makrostruktury.

Pro kontrolu mikrostruktury musí být odebrány vzorky makrostruktury ze základního materiálu, z přechodu do základního materiálu – tepelně ovlivněná oblast a z návaru [6].

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

Zkoušení tvrdosti

Zkoušení tvrdosti podle Vickerse HV10 nebo HV 5 musí být vykonáno podle ISO 9015 – 1*. Vtisky tvrdosti musí být provedeny dle obrázku dle [6]. Patříčná tvrdost musí být měřena v linii pod úhlem 15° k povrchu, zahrnující návar, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál. U tvrdokovového návaru musí být provedeno nejméně pět vtisků na opracovaném povrchu zkušební vzorku [6].

Chemická analýza: Provést na povrchu návaru dle obrázku 6 dle [6].

3.11.4 Kritéria přípustnosti u destruktivního zkoušení

Kontrola makrostruktury: Nejsou přípustné trhliny a jiné rovinné vady a jednotlivé póry větší než 2 mm. Malé jednotlivé trhliny (<1,5 mm) mohou být akceptovány, pokud jsou omezeny na krycí vrstvy v případě návaru tvrdých kovů a niklových/kobaltových slitin [6].

Kontrola mikrostruktury: Nejsou přípustné trhliny větší než 1,5 mm, pokud se nestanoví jinak [6].

Zkoušení tvrdosti: Hodnoty tvrdosti nesmí být vyšší než hodnoty uvedené v tabulce 2 dle [6]. Pro základní materiál 15NiCuMoNb5-6-4, který je dle TNI CEN ISO/TR 15608 zařazen do skupiny materiálu 4.2 [48] jsou maximální hodnoty tvrdosti rovny 380 HV10 pro tepelně nezpracovaný materiál a 320 HV10 pro tepelně zpracovaný materiál [6].

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

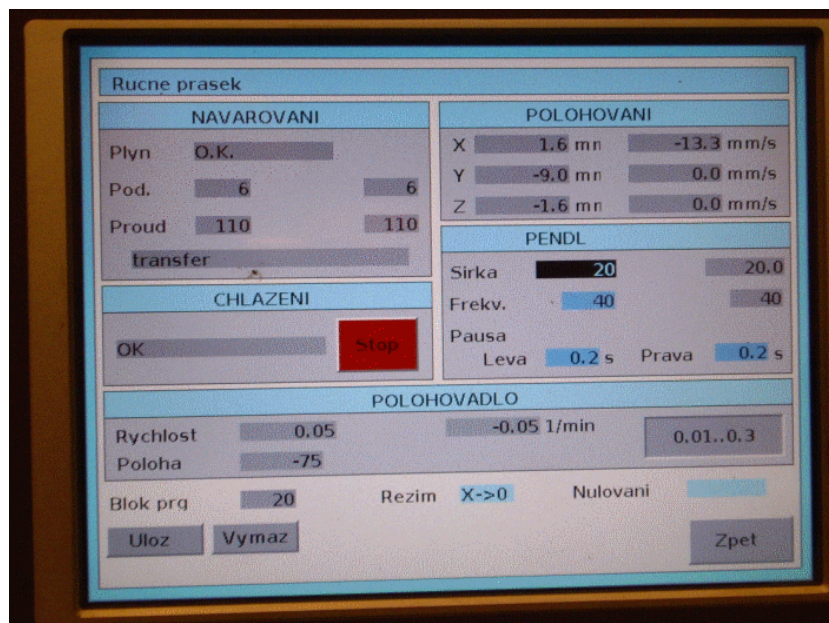
4 Provedení návarů na vhodně upravené plochy sedel šoupátek upravené třískovým obráběním

Jelikož se jedná o schvalování postupu navařování s následným vystavením dokumentu WPQR, navařování proto musí probíhat na zkušebních vzorcích, nikoli na komponentech armatury tj. na plochách sedel šoupátek a klínů.

Navařování zkušebních vzorků bylo provedeno dne 17. 2. 2010 dle normy ČSN EN ISO 15614 – 7 [60]. Tvar zkušebních vzorků je zobrazen v kap. 3.3 Zkušební vzorky na (Obr. 3.1). Jako technologické postupy byly použity protokoly pWPS pro oba zkušební vzorky viz Příloha č. 4.

4.1 Příprava navařování zkušebních vzorků

Nejprve byl na plazmovém navařovacím automatu PPC 250 PTM proměřen parametr proudu, zda jeho velikost nastavená na řídicím panelu odpovídá skutečné hodnotě. Jako měřidlo byl použit klešťový multimetr Kaise SK – 7720. Následně pro kontrolu všech parametrů a funkcí stroje byl ještě proveden zkušební návar na součásti obdobných rozměrů jako zkušební vzorky. Svařovací proud byl nastaven na 105 A, posléze zvýšen na 110 A. Parametr podávání přídavného prášku byl nastaven na hodnotu 6, což odpovídá průtoku prášku asi $14 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$. Na (Obr. 4.1) je zobrazen detail monitoru řídicího panelu navařovacího automatu s těmito nastavenými parametry a následující fotografie ukazuje provedený zkušební návar pro ověření funkcí stroje.



Obr. 4.1 Monitor řídicího panelu navařovacího automatu PPC 250 PTM během navařování zkušební návaru.



Obr. 4.2 Provedený zkušební návar pro ověření funkcí stroje.

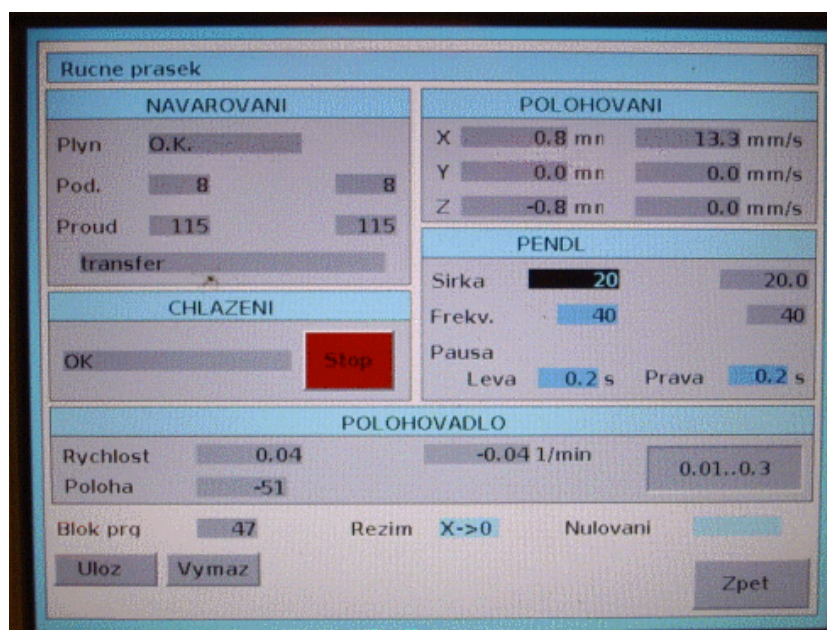
4.2 Navařování zkušební vzorku č. 1

Zkušební vzorek č. 1 byl vyndán z předehřívací pece, upnut do sklíčidla na otočném stole navařovacího automatu a dotykovým digitálním teploměrem Greissinger GTH 1150 byla znovu překontrolována teplota předehřevu, která měla činit $T_p = 250^\circ\text{C}$. Poté byly nastaveny parametry pro navařování první vrstvy dle pWPS 7R-1268, viz. Příloha č. 5, pro zkušební vzorek č. 1. Jednalo se o tyto parametry:

- Velikost proudu: 115 A.
- Parametr množství podávaného prášku: 8, odp. množství prášku $16 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$.

- Frekvence pendlu hořáku: 40 min^{-1} .
- Prodlevy v úvratích: 0,2 s.
- Rychlost otáčení polohovadla: $0,04 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Průtoky plynů:
 - Plazmový: $180 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.
 - Dopravní: $150 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.
 - Ochranný: $600 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

Na (Obr. 4.3) je zobrazen detail monitoru řídicího panelu s těmito nastavenými parametry před započítím navařování zkušební vzorku č. 1.



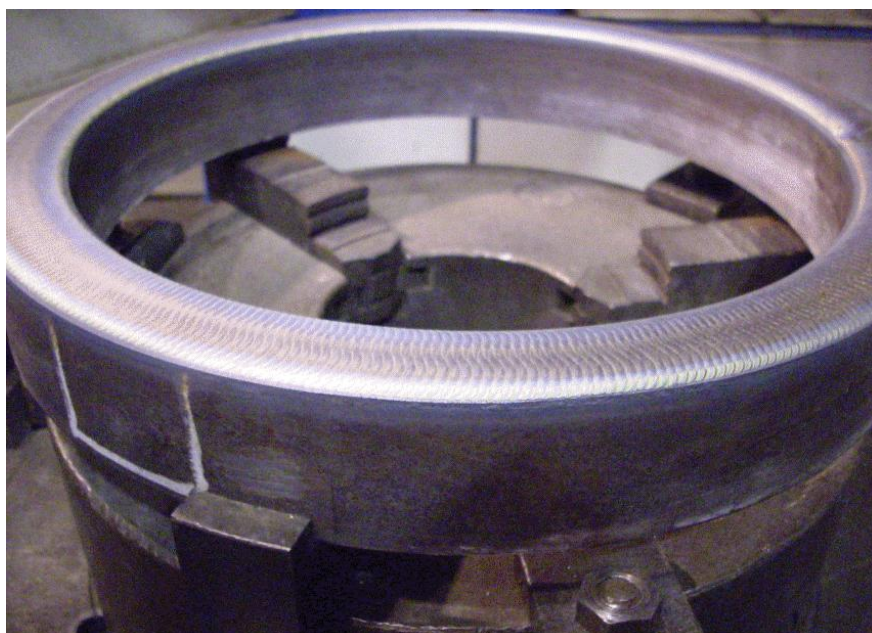
Obr. 4.3 Monitor řídicího panelu navařovacího automatu PPC 250 PTM s nastavenými parametry před započítím navařování zkušební vzorku č. 1.

Následující fotografie zobrazuje ustavení zkušební vzorku č. 1 ve tříčelistovém sklíčidle na polohovadle a plazmového hořáku těsně před započítím navařování.



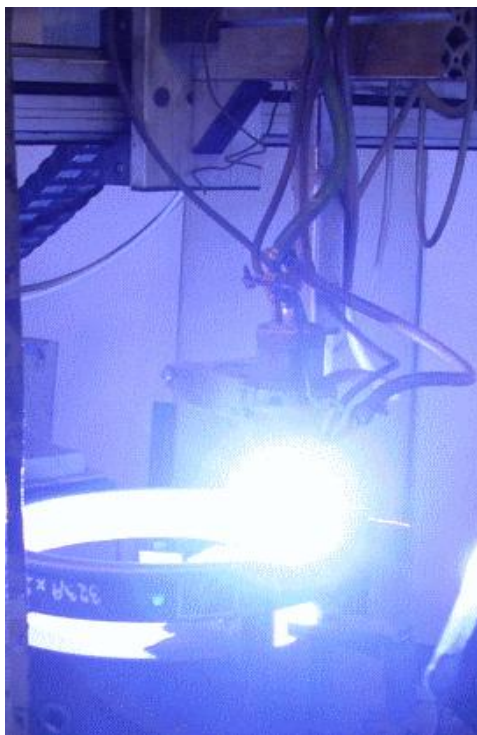
Obr. 4.4 Ustavení zkušebního vzorku č. 1 a plazmového hořáku těsně před započetím navařování.

Zkušební vzorek č. 1 po navaření první vrstvy Stellite 6 je zobrazen na (Obr. 4.5)

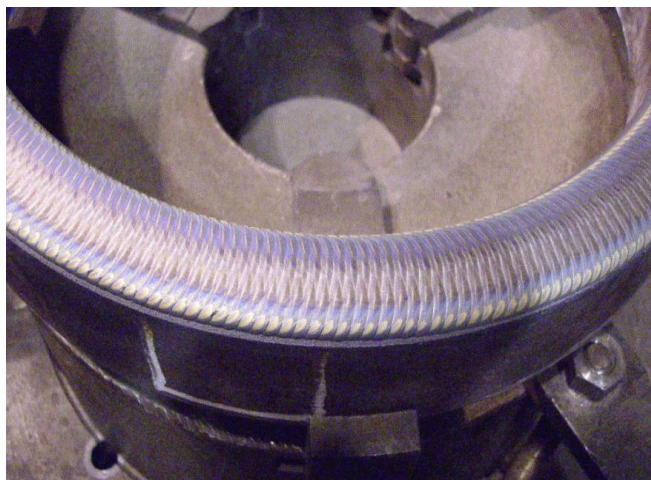


Obr. 4.5 Zkušební vzorek č. 1 po navaření první vrstvy Stellite 6.

Po navaření první vrstvy na zkušební vzorek č. 1 byla dotykovým digitálním teploměrem změřena teplota Interpass, která dle pWPS měla činit max. 300°C. Návar byl dále mechanicky očištěn a následně bylo započato navařování druhé vrstvy. Hodnoty nastavovaných veličin zůstaly stejné jako pro navařování první vrstvy, jen rychlost otáčení polohovadla byla zvýšena na 0,05 ot·min⁻¹ a prodleva v úvratích zvýšena na hodnotu 0,4 s, z důvodu snížení velikosti tloušťky druhé vrstvy návaru. Průběh plazmového navařování druhé vrstvy návaru Stellite 6 u zkušební vzorku č. 1 je zobrazen na (Obr. 4.6) a následující fotografie ukazuje detail tohoto vzorku po navaření druhé vrstvy Stellite 6.



Obr. 4.6 Průběh plazmového navařování druhé vrstvy návaru Stellite 6 u zkušební vzorku č. 1.



Obr. 4.7 Detail zkušební vzorku č. 1 po navaření druhé vrstvy Stellite 6.

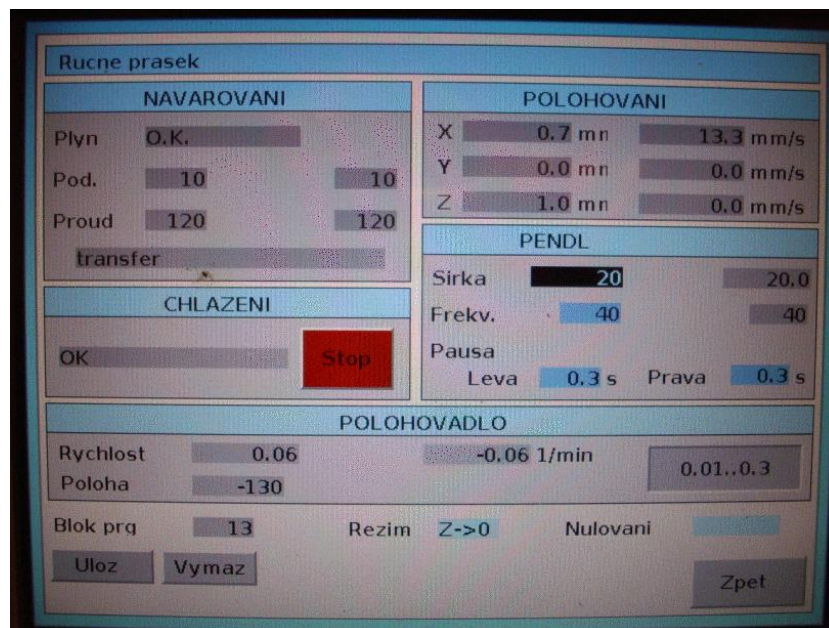
Po navaření druhé vrstvy byl zkušební vzorek č. 1 sundán ze sklíčidla umístěného na polohovadle a přesunut do žíhací pece, která byla nastavena na teplotu předehřevu, tudíž před vlastním započítáním žíhání nedochází k ochlazení zkušebních vzorků. Je to rovněž možnost zamezení vzniku žíhacích trhlin.

4.3 Navařování zkušebního vzorku č. 2

Průběh navařování zkušebního vzorku č. 2 byl obdobný průběhu u vzorku č. 1. Vzorek byl vyndán z předehřívací pece, upnut do sklíčidla navařovacího automatu a rovněž byla zkontrolována teplota předehřevu. Následovalo navařování první vrstvy s těmito parametry dle pWPS 7R-1268, viz. Příloha č. 4 pro zkušební vzorek č. 2:

- Velikost proudu: 120 A.
- Parametr množství podávaného prášku: 10, odpovídá množství prášku $18 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Frekvence pendlu hořáku: 40 min^{-1} .
- Prodlevy v úvratích: 0,3 s.
- Rychlost otáčení polohovadla: $0,06 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Průtoky plynů:
 - Plazmový: $180 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.
 - Dopravní: $150 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.
 - Ochranný: $600 \text{ l} \cdot \text{h}^{-1}$.

Monitor řídicího panelu navařovacího automatu PPC 250 PTM s nastavenými parametry před započítáním navařování první vrstvy u zkušebního vzorku č. 2. je zobrazen na (Obr. 4.8) a průběh navařování první vrstvy Stellite 6 zobrazuje (Obr. 4.9).

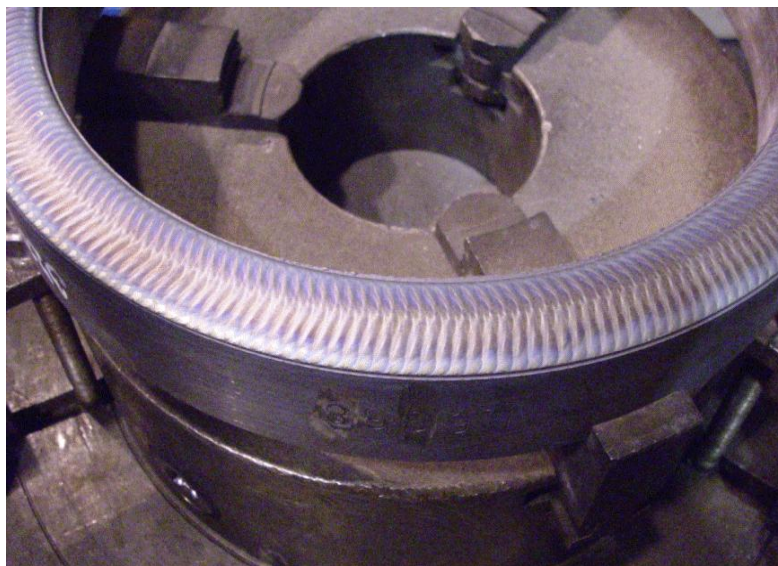


Obr. 4.8 Monitor řídicího panelu navařovacího automatu PPC 250 PTM s nastavenými parametry před započetím navařování první vrstvy Stellite 6 u zkušební vzorku č. 2.



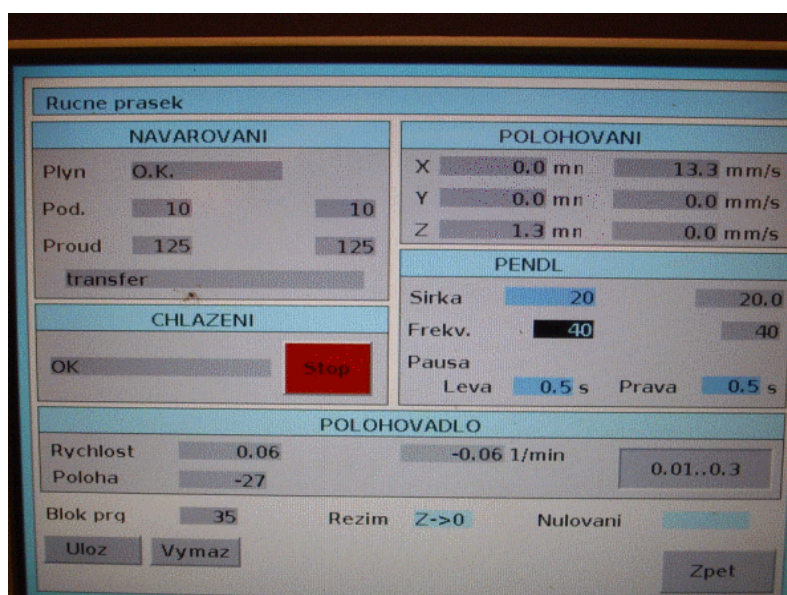
Obr. 4.9 Průběh navařování první vrstvy Stellite 6 u zkušební vzorku č. 2.

Detail zkušební vzorku č. 2 po navaření první vrstvy Stellite 6 je zobrazen na (Obr. 4.10).



Obr. 4.10 Detail zkušební vzorku č. 2 po navaření první vrstvy Stellitu 6.

Po navaření první vrstvy Stellitu 6 následovala kontrola teploty Interpass a došlo ke změně hodnot parametrů navařování, které byly před navařením druhé vrstvy upraveny dle pWPS 7R-1268, viz. Příloha č. 4 pro zkušební těleso č. 2 takto: Velikost proudu byla zvýšena na 125 A, prodlevy v úvratích zvýšeny na 0,5 s. Ostatní hodnoty parametrů zůstaly zachovány. V tomto případě byla velikost proudu zvýšena z důvodu lepšího natavení přídavného prášku. Monitor řídicího panelu navařovacího automatu PPC 250 PTM s nastavenými parametry před započítím navařování druhé vrstvy Stellitu 6 u zkušební vzorku č. 2. je zobrazen na (Obr. 4.11).



Obr. 4.11 Monitor řídicího panelu navařovacího automatu PPC 250 PTM s nastavenými parametry před započítím navařování druhé vrstvy Stellitu 6 u zkušební vzorku č. 2.

Fotografie zkušební vzorku č. 2 po navaření druhé vrstvy Stellite 6 jsou zobrazeny na (Obr. 4.12).



Obr. 4.12 Detail zkušební vzorku č. 2 po navaření druhé vrstvy Stellite 6.

Po navaření druhé vrstvy byl zkušební vzorek vložen do žíhací pece, v níž již byl umístěn vzorek č. 1 a započal proces žíhání na snížení vnitřního pnutí. Parametry žíhání byly vypočteny v kap. 3.9.1 Volba tepelného zpracování – žíhání na snížení vnitřního pnutí a jsou rovněž obsaženy v protokolech pWPS 7R-1268, viz. Příloha č. 5 pro oba zkušební vzorky.

Parametry byly určeny takto:

- Žíhací teplota: $(630 \pm 10)^\circ\text{C}$.
- Rychlost ohřevu na žíhací teplotu: $100^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$.
- Rychlost ochlazování v peci: $130^\circ\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$, až do teploty okolí.
- Doba výdrže na žíhací teplotě: 120 min.

Po žíhání následovalo otryskání a obrobení zkušebních vzorků na finální rozměry.

5 Posouzení návarů z hlediska ovlivnění základního materiálu a jejich mechanických vlastností

Dne 3. 4. 2010 proběhly ve společnosti AG některé nedestruktivní kontroly zkušebních vzorků ze základního materiálu 15NiCuMoNb5-6-4 s dvouvrstvým návarem typu Stellite 6.

Pro předběžnou orientaci a zjištění, zda jsou zkušební vzorky vyhovující, byly kromě základních zkoušek, které lze realizovat ve společnosti AG, tj. vizuální kontrola, ultrazvuková a penetrační zkouška, interně doplněny orientační zkoušky měření tvrdosti návaru a spektrometrická analýza chemického složení návaru. Oficiální zkoušky těchto dvou veličin probíhají v externí akreditované zkušebně VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. Na (Obr. 5.1) je pro názornost zobrazen zkušební vzorek po opracování na finální rozměry, před započítáním nedestruktivního zkoušení.



Obr. 5.1 Zkušební vzorek po opracování na finální rozměry.

5.1 Vizuální kontrola

Vizuální kontrolou se zjišťuje, zda se na návarech nenachází viditelné defekty, jako jsou trhliny, póry, nerovnoměrnost návaru a spojení se základním materiálem. Zkouška proběhla dle ČSN EN 970* úspěšně. U obou vzorků nebyly shledány vady. Protokol o zkoušce je součástí dokumentu WPQR, jehož první 2 strany jsou uvedeny v Příloze č. 6.

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

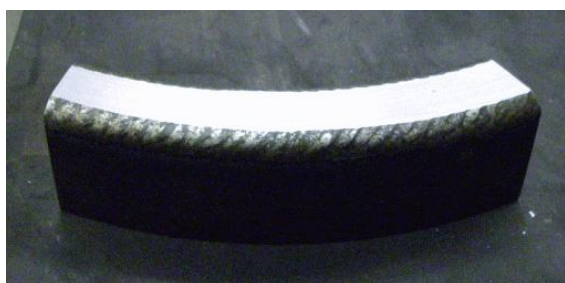
5.2 Zkouška ultrazvuková

Ultrazvuková zkouška obecně zjišťuje vnitřní vady. V tomto případě se zejména jedná o vady na hranici ztavení základního materiálu a návaru. Tato zkouška byla prováděna dle ČSN EN 1714*, s interním kritériem vyhodnocení vady, které je vůči normě ČSN EN ISO 15614 – 7 [6] ve společnosti AG čtyřikrát přísnější, viz kap. 3.11.2 Kritéria přípustnosti u nedestruktivního zkoušení. Zkoušení se provádělo ultrazvukovým přístrojem SONATEST Sitescan 240, metodou odrazovou impulsní. Tento přístroj je zobrazen na (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 Ultrazvukový přístroj SONATEST Sitescan 240.

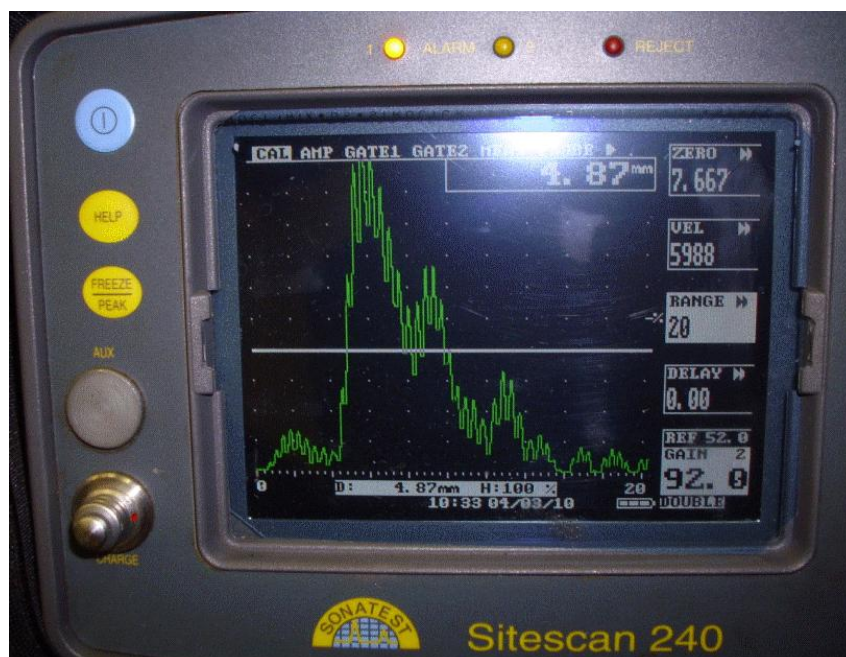
Ultrazvukový přístroj byl nejprve zkalibrován pomocí etalonu s uměle vytvořenou vadou s plochým dnem o průměru 2 mm, která je vytvořena vyvrtáním, končícím na hranici základní materiál – návarový kov.



Obr. 5.3 Etalon s uměle vytvořenou vadou s náwarem po opracování (obr. vlevo), detail simulované vady – vývrt s plochým dnem o průměru 2 mm do hloubky na hranici ztavení základního materiálu a návarového kovu (obr. vpravo).

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

Detail vadového echa, při lokalizaci vady sondou na etalonu během kalibrace ultrazvukového přístroje, je zobrazen na (Obr. 5.4).



Obr. 5.4 Detail vadového echa, při lokalizaci vady sondou na etalonu během kalibrace ultrazvukového přístroje.

Průběh zkoušky spočíval v nanesení vazebního prostředku a následném projíždění sondy po povrchu návaru. Toto je zobrazeno na (Obr. 5.5).



Obr. 5.5 Průběh ultrazvukové zkoušky.

Výsledkem zkoušky je, že vady s rozměry většími než 2 mm u obou zkušebních vzorků nebyly nalezeny, zkouška je proto vyhovující. Protokol o zkoušce je součástí dokumentu WPQR, jehož první 2 strany jsou uvedeny v Příloze č. 6.

5.3 Předběžná zkouška tvrdosti návaru

Před provedením zkoušky tvrdosti návaru bylo provedeno očištění a odmaštění zkušebních vzorků po předchozí ultrazvukové zkoušce. Měření tvrdosti bylo provedeno digitálním přístrojem na měření tvrdosti Krautkramer MIC 10, evidenční číslo 1923, který je zobrazen na (Obr. 5.6).



Obr. 5.6 Digitální tvrdoměr Krautkramer MIC 10.

Přístroj byl před měřením zkalibrován a poté byla na obou vzorcích změřena tvrdost na šesti místech obvodu. Ustavení tvrdoměru na zkušební těleso během zkoušky je zobrazeno na (Obr. 5.7).



Obr. 5.7 Ustavení tvrdoměru na zkušebním tělese.

Výsledné hodnoty velikostí tvrdosti jsou byly v rozmezí hodnot (38 – 46) HRC, což přibližně odpovídá hodnotám (372 – 460) HV a odpovídají požadavkům kladeným na tento návar.

5.4 Předběžná spektrometrická analýza chemického složení návaru

Analýza proběhla na spektrometru Belec Compact Port, v.č. 0853 u obou vzorků na šesti místech obvodu opracovaného povrchu návaru tak, že argonová odjiskřovací pistole byla umístěna na povrchu návaru a spektrální analýzou byly na monitoru přístroje zobrazovány výsledné hodnoty chemického složení návaru. Tento měřicí přístroj je zobrazen na (Obr. 5.8), následující obrázek zobrazuje ustavení odjiskřovací pistole na povrchu návaru během spektrometrie a na (Obr. 5.10) je zobrazen detail stopy na ploše návaru po spektrometrické analýze.



Obr. 5.8 Spektrometr Belec Compact Port.



Obr. 5.9 Ustavení odjiskřovací pistole na povrchu návaru během spektrometrie.



Obr. 5.10 Detail stopy na ploše návaru po spektrometrické analýze

Informační protokol o předběžně naměřených hodnotách chemického složení návaru u obou vzorků je uveden v Příloze č. 7.

5.5 Kapilární zkouška

Kapilární zkouška byla provedena dle ČSN EN 571* pro oba zkušební vzorky. Tyto byly očištěny a odmaštěny, na jejich povrch byl nátěrem nanesen penetrant. Jeden ze zkušebních vzorků s naneseným penetrantem je zobrazen na (Obr. 5.11).



Obr. 5.11 Penetrant nanesený na zkušební vzorek.

Po uplynutí tzv. penetračního času, byl penetrant ze zkušebních vzorků setřením textilní látkou odstraněn a následovalo a osušení čistou textilií.

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

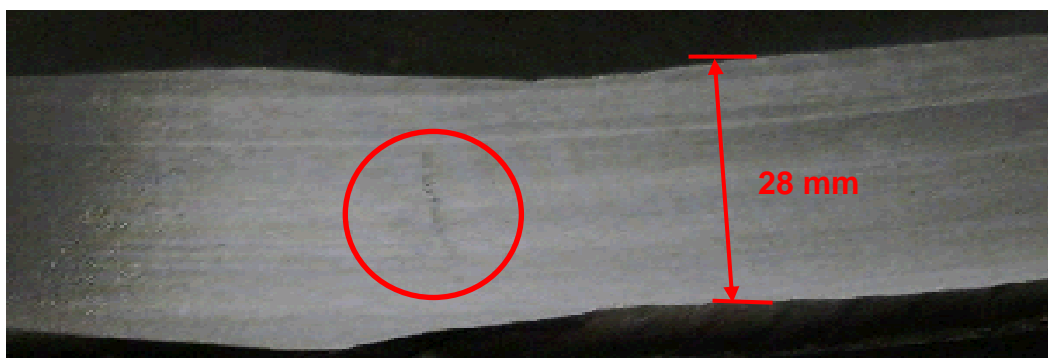
Další částí zkoušky je tzv. vyvolání indikace, což je nanesení vývojky na povrch zkušebních vzorků. Bylo to provedeno nástřikem. Povrchy zkušebních vzorků měly nyní bílou vyvolávací vrstvou. Na (Obr. 5.12) je zobrazeno nanesení vývojky na jeden ze zkušebních vzorků.



Obr. 5.12 Vývojka nanesená na zkušební vzorek.

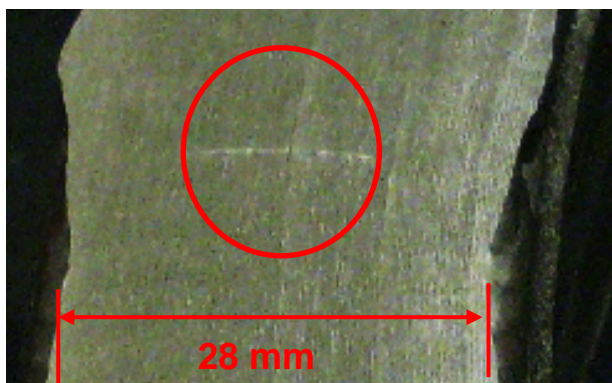
Vyhodnocení zkoušky probíhá vizuálně tak, že na bílé vyvolávací vrstvě se po určité době, tzv. indikačním čase, může objevit barevná indikace případné vady.

Vzorek č. 2 byl shledán bez závad. U vzorku č. 1 byla indikována souvislá liniová vada – trhlina, přes celou šířku návaru. Tato je dle normy ČSN EN 5817* nepřijatelná. Proto byl zkušební vzorek č. 1 vyřazen z dalšího zkoušení. Tato trhlina je zobrazena na (Obr. 5.13 a 5.14)



Obr. 5.13 Souvislá liniová vada – trhlina u zkušebního vzorku č. 1, zjištěná kapilární zkouškou.

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků



Obr. 5.14 Detail souvislé liniové vady – trhliny u zkušebního vzorku č. 1, zjištěno kapilární zkouškou.

Protokol o zkoušce je součástí dokumentu WPQR, jehož první 2 strany jsou uvedeny v Příloze č. 6.

Další zkoušky byly provedeny v externí akreditované zkušebně VÍTKOVICE TESTING CENTER s.r.o. Jedná se o zkoušky tvrdosti podle Vickerse HV10, chemickou analýzu návaru a makroskopickou a mikroskopickou kontrolu. Zkoušení proběhlo v období od 25. 3. 2010 do 12. 4. 2010. Objednávkové listy s požadovanými zkouškami do této zkušebny jsou uvedeny v Příloze č. 8.

5.6 Zkouška tvrdosti dle Vickerse HV10

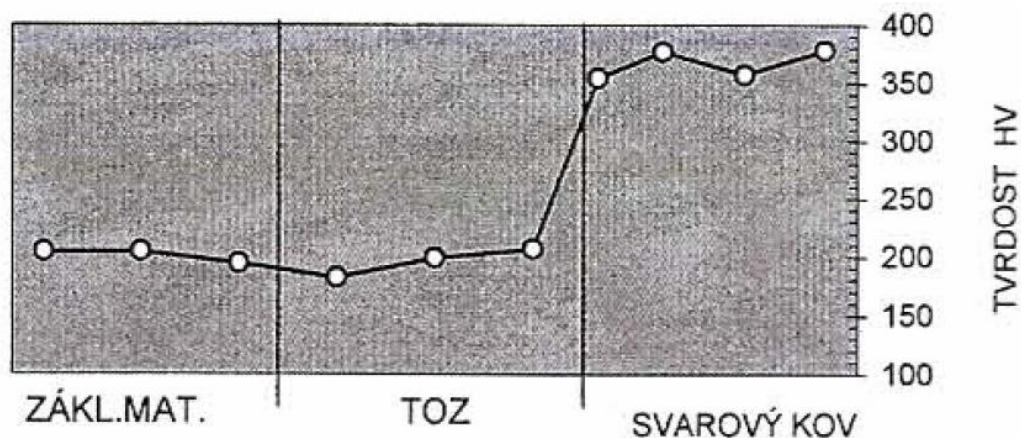
Zkouška byla provedena na digitálním tvrdoměru EMCO TEST M4U – 750, podle zkušebních norem ČSN EN 1043 – 1* a ČSN EN ISO 6507*. Měření příčné tvrdosti bylo provedeno dle ČSN EN ISO 15614 – 7 [60], obrázek č. 5 pro základní materiál (3 měření), tepelně ovlivněnou oblast (2 měření V TOO, 3 měření na hranici ztavení) a návar (4 měření). Výsledné hodnoty jsou převzaty z protokolu: Výsledky mechanických zkoušek, zkoušky tvrdosti, viz. Příloha č. 9 a zobrazeny v (Tab. 5.1).

Tab. 5.1 Příčná tvrdost HV10 u zkušebního vzorku.

TVRDOST HV10									
Základní materiál			TOO			Návar			
						182			
204	204	194	182	199	228	354	377	357	378
						210			

* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

Na (Obr. 5.15) jsou výše uvedené příčné tvrdosti HV10 zobrazeny v grafické podobě, převzato z Přílohy č. 9.



Obr. 5.15 Grafické znázornění průběhu příčné tvrdosti v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a návaru

Vyhodnocení výsledků příčné zkoušky tvrdosti: Dle kap. 3.11.4 Kritéria přípustnosti u destruktivního zkoušení hodnoty tvrdosti nesmí být vyšší než hodnoty uvedené v tabulce 2 dle [60]. Pro základní materiál 15NiCuMoNb5-6-4, zařazený dle TNI CEN ISO/TR 15608 do skupiny materiálu 4.2 je maximální hodnota tvrdosti rovna 320 HV10 pro tepelně zpracovaný materiál. V tomto případě je maximální tvrdost základního materiálu rovna 204 HV10. Základní materiál je v tomto ohledu vyhovující.

Dalším typem zkoušení bylo měření povrchové tvrdosti návaru a to ve třech skutečných tloušťkách návaru – 3 mm; 2,5 mm a 1 mm. Tyto tloušťky byly stanoveny na základě makroskopické zkoušky, viz. kap. 5.8 Makroskopická a mikroskopická kontrola. Jedná se o vzdálenosti hranice ztavení až po opracovanou plochu. Bylo provedeno 5 vtisků při každém měření. Na (Obr. 5.15) je zobrazen digitální tvrdoměr EMCO TEST M4U – 750 během měření povrchové tvrdosti. Následující obrázek zobrazuje detail naměřené hodnoty tvrdosti 467 HV10.



Obr. 5.16 Digitální tvrdoměr EMCO TEST M4U – 750 během měření povrchové tvrdosti,



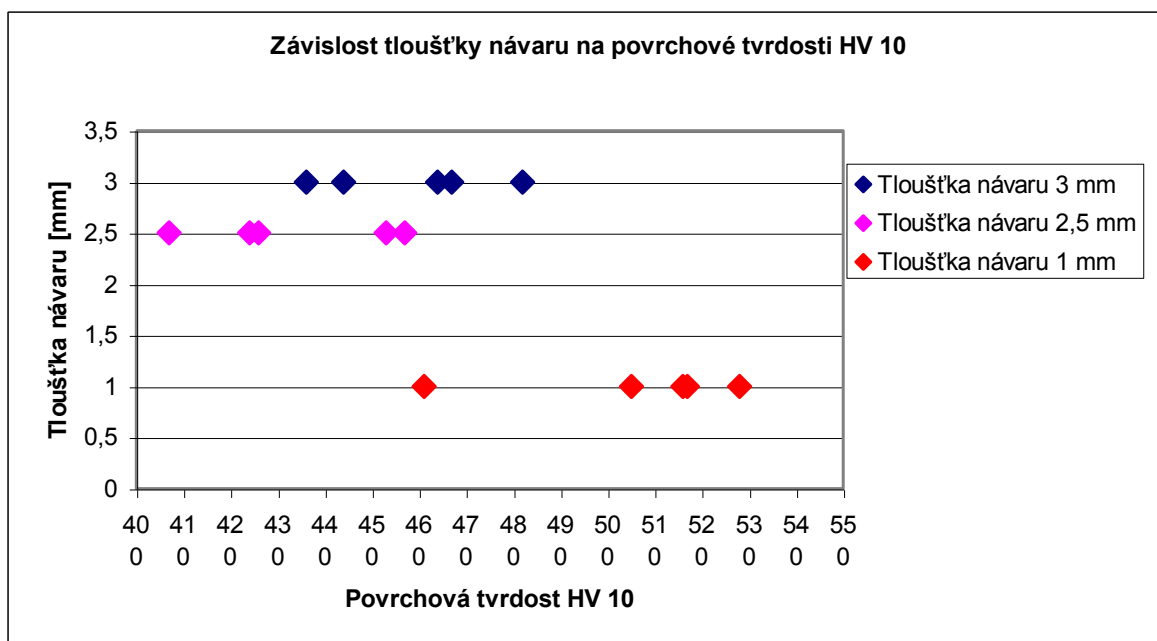
Obr. 5.17 Detail naměřené hodnoty tvrdosti 467 HV10.

Jednotlivé naměřené hodnoty ve třech tloušťkách návaru jsou zobrazeny v (Tab. 5.2). Hodnoty jsou rovněž převzaty z protokolu Výsledky mechanických zkoušek, zkoušky tvrdosti, který je uveden v Příloze č. 9.

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty povrchové tvrdosti HV 10 v různých tloušťkách návaru.

Měření	Tloušťka návaru 3 mm	Tloušťka návaru 2,5 mm	Tloušťka návaru 1 mm
1	464	457	516
2	436	407	505
3	467	426	517
4	444	424	528
5	482	453	461

Na (Obr. 5.18) je zobrazena závislost tloušťky návaru na povrchové tvrdosti HV10. Hodnoty převzaty z (Tab. 5.2).



Obr. 5.18 Závislost tloušťky návaru na povrchové tvrdosti HV10.

Z (Tab. 5.2) popř. z grafu na (Obr. 5.18) je patrné, že povrchová tvrdost HV10 se v předpokládané tloušťce návaru 3 mm pohybuje v rozmezí (436 – 482) HV10, což přibližně odpovídá (44 – 48) HRC. Povrchová tvrdost ve skutečné tloušťce návaru 2,5 mm se pohybuje v rozmezí (407 – 457) HV10. V tomto případě se již jedná o původní první vrstvu návaru. Výsledné hodnoty v tloušťkách návaru 3 mm a 2,5 mm se výrazně neodlišují a jejich část leží ve stejném poli hodnot. Rozdíl nastává u hodnot tvrdosti, které jsou v tloušťce návaru 1 mm. Jedná se zde rovněž o původní první vrstvu návaru. Hodnoty povrchové tvrdosti se pohybují v rozmezí (461 – 516) HV10, což přibližně odpovídá (46 – 50) HRC. Z výsledků vyplývá, že se zmenšující se tloušťkou návaru roste jeho tvrdost. Může způsobeno tím, že blíže základnímu materiálu dochází již k částečnému promísení přídavného prášku

a základního materiálu se současným vznikem zejména karbidů chrómu a wolframu, které zvyšují tvrdost. Rovněž to může být způsobeno tzv. koncentračním spádem nebo procesy difúze. Tato tvrdá martenzitická struktura nemohla vzniknout díky rychlému ochlazení, neboť ihned po navaření došlo k vložení do žíhací pece a řízenému udržování teploty.

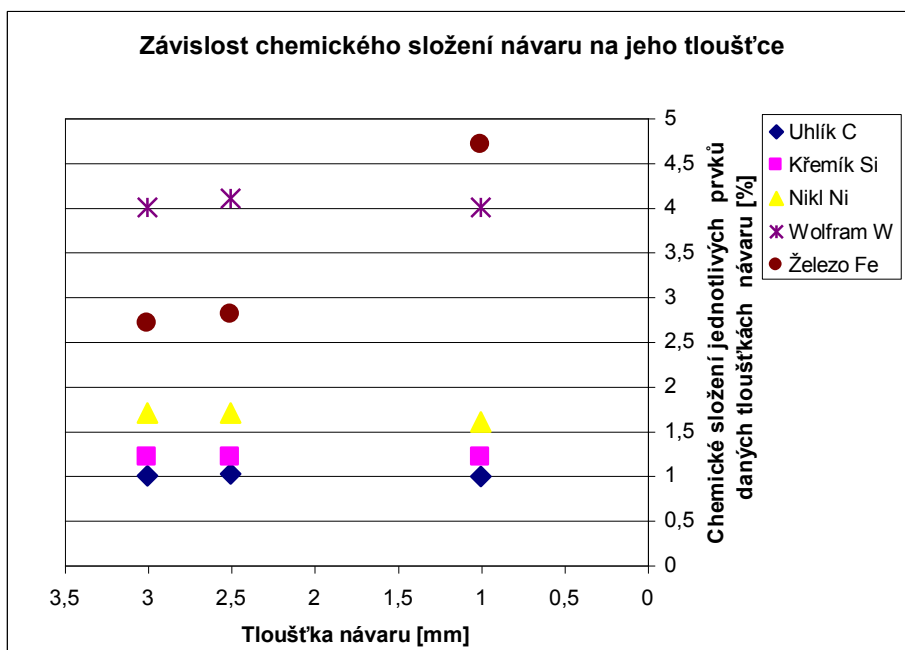
5.7 Chemická analýza návaru

Rozbor chemického složení byl proveden rovněž ve skutečných tloušťkách návaru 3 mm; 2,5 mm a 1 mm. Výsledné hodnoty chemického složení v těchto tloušťkách návaru jsou zobrazeny v (Tab. 5.3) a jsou převzaty z protokolů: Protokoly o zkoušení, rozbor chemického složení, viz. Příloha č. 10.

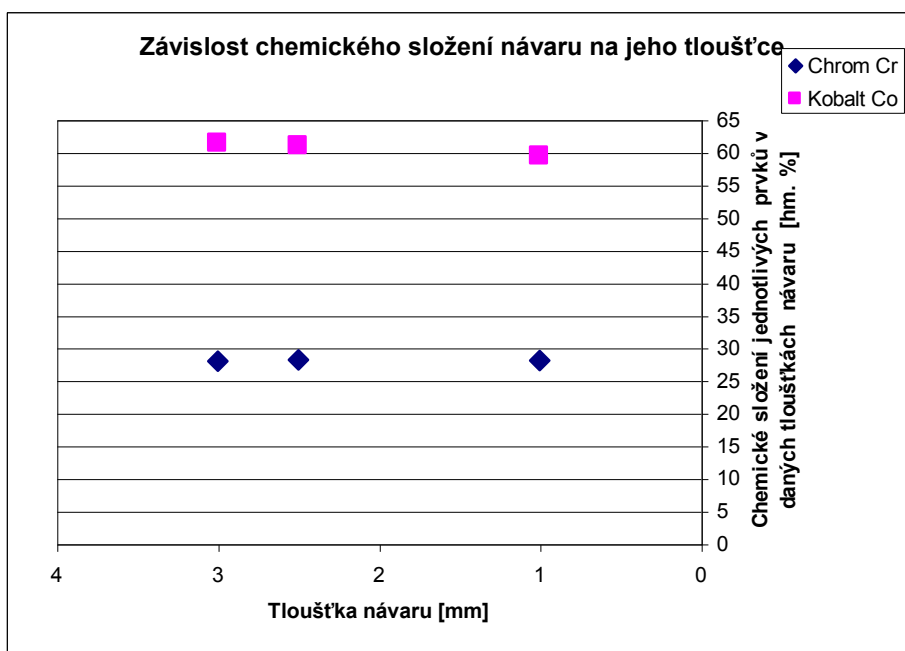
Tab. 5.3 Výsledné hodnoty chemického složení v daných tloušťkách návaru.

Chemický prvek	Tloušťka návaru 3 mm	Tloušťka návaru 2,5 mm	Tloušťka návaru 1 mm
C [hm. %]	0,996	1,02	0,99
Si [hm. %]	1,2	1,2	1,2
Ni [hm. %]	1,7	1,7	1,6
Cr [hm. %]	28	28,2	28,1
W [hm. %]	4	4,1	4
Fe [hm. %]	2,7	2,8	4,7
Co [hm. %]	Zbytek	Zbytek	Zbytek

Graficky jsou závislosti chemického složení návaru na jeho tloušťce zobrazeny na (Obr. 5.19 a 5.20).



Obr. 5.19 Závislost chemického složení návaru na jeho tloušťce.



Obr. 5.20 Závislost chemického složení návaru na jeho tloušťce.

Z výsledků dle (Tab. 5.3) a (Obr. 5.19 a 5.20) vyplývá, že chemické složení návaru se i přes snižující tloušťku výrazně nemění s výjimkou železa, u něhož je při tloušťce návaru 1 mm patrný nárůst o přibližně 2 hm. % až na hodnotu 4,7 hm. %. Toto je způsobeno počínajícím promísením se základním materiálem. Pokud by byla provedena chemická analýza v nižších tloušťkách návaru než 1 mm, docházelo by k výraznému nárůstu hodnoty prvku železa v návaru. Pro optimální

vlastnosti návaru Stellit 6 by se měla hodnota Fe v chemickém rozboru pohybovat do 5 hm.%. Současně lze tvrdit, že ačkoliv má návar tloušťku jen 1 mm, z hlediska chemického složení je stále vyhovující a při této tloušťce jsou stále zaručeny očekávané vlastnosti návaru.

5.8 Makroskopická a mikroskopická kontrola

Makroskopická a mikroskopická kontrola byla provedena dle ČSN EN 1321*. Vyhodnocení zkoušek a fotografie jsou čerpány z Protokolu o zkoušení, makrostruktura a mikrostruktura, viz. Příloha číslo 11.

Makrostruktura zkušebního vzorku byla po naleptání dle metody Adler – Matting shledána bez vad. Maximální velikost šířky tepelně ovlivněné oblasti byla zjištěna na 6 mm. Na (Obr. 5.21) je zobrazena makrostruktura zkušebního vzorku při dvojnásobném zvětšení.



Obr. 5.21 Makrostruktura zkušebního vzorku při dvojnásobném zvětšení.

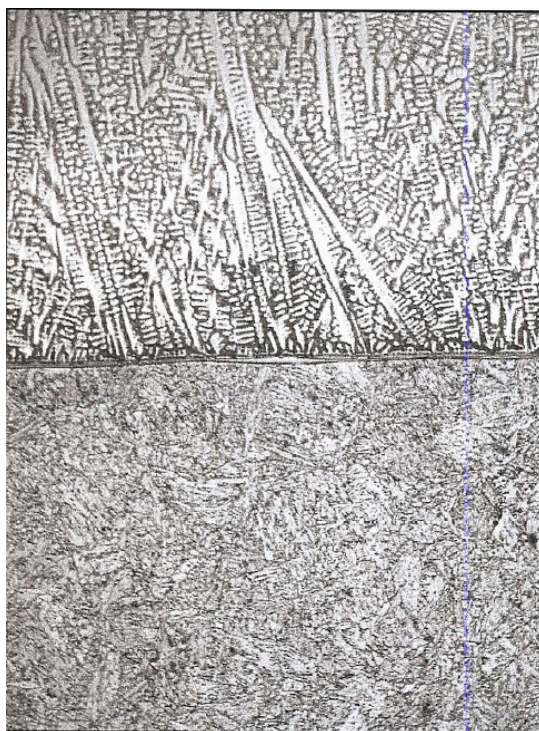
* Viz. Příloha č. 5 Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků

Mikrostruktura byla provedena leptadlem chemického složení H_2CrO_4 , což je kyselina chromová. Bylo zjištěno, že mikrostruktura návaru je licí, tvořená karbidickým eutektikem v základní CoCr slitinové matici. Na (Obr. 5.22) je tato struktura zobrazena při stonásobném zvětšení.



Obr. 5.22 Mikrostruktura návarového kovu, zvětšeno 100×

Mikrostrukturu teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení tvoří popuštěný bainit a ferit. Toto je zobrazeno na (Obr. 5.23) při stonásobném zvětšení. Je patrné, že hranice ztavení je rovnoměrná, bez výrazného zvlnění.



Obr. 5.23 Mikrostruktura teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení, zvětšeno 100×

U základního materiálu je mikrostruktura rovněž tvořena popuštěným bainitem a feritem. Tím byl potvrzen předpoklad struktury materiálu 15NiCuMoNb5-6-4, dle Kap. 2.5.1 Označování materiálu. Tato struktura je zobrazena na (Obr. 5.24) při stonásobném zvětšení.



Obr. 5.24 Mikrostruktura základního materiálu, zvětšeno 100×.

Zkušební vzorek byl shledán za vyhovující po všech provedených zkouškách, jedná se o původní zkušební vzorek č. 2. Proto navařování těsnících ploch šoupátek bude probíhat dle WPS a protokolu WPQR, které navazují na původní pWPS 7R-1268 pro zkušební vzorek č. 2. První dvě strany dokumentu o kvalifikaci postupu navařování WPQR jsou v příloze č. 6 a z něj vyplývající dokument specifikace navařování WPS, viz. příloha č.12. Jsou v něm uvedeny výsledné parametry navařování.

6 Stanovení technologických postupů s ohledem na použité přípravky

Vzhledem k tomu, že zkušební vzorky měly přibližně stejný tvar jako sedla šoupátek, proto i použitý systém upínání pro tyto komponenty zůstane stejný jako u navařování zkušebních vzorků a jedná se konkrétně o univerzální tříčelistové sklíčidlo, které je upnuté na lícni desce rotačního polohovadla. Pro těsnící komponenty větších rozměrů se na upínání použije středícího čepu a upínek. Dle výkresové dokumentace společnosti AG byl v programu AutoCad překreslen výrobní výkres sedla pro šoupátka S43 s konkrétními rozměry, který je uveden v Příloze č. 13.

6.1 Technologický postup výroby sedla

1. Nařezat materiál s přídávkem na opracování.
2. Opracovat součást, opracovat návarové plochy.
3. Kontrola rozměrů po opracování, výsledky zapsat do Náměrového listu.
4. Penetrační zkouška plochy určené pro návar dle ČSN EN 571, vyhodnocení přípustnosti vad – bez trhlin.
5. Předehřev součásti.
6. Navaření 1. vrstvy, mechanické očištění návaru, vizuální kontrola, kontrola teploty Interpass.
7. Navaření 2. vrstvy, mechanické očištění návaru, vizuální kontrola.
Po navaření zkontrolovat celkovou tloušťku návaru – výšku komponentu armatury (před vložením do pece).
8. Tepelné zpracování – žíhání na snížení vnitřního pnutí.
9. Otryskání.
10. Opracování kusu načisto.
11. Nedestruktivní kontroly – vizuální kontrola, penetrační zkouška, ultrazvuková zkouška, kontrola tvrdosti na šesti místech obvodu, kontrola chemického složení na opracované ploše na čtyřech místech obvodu.
12. Kontrola finálních rozměrů dle výkresu. Výsledky zapsat do náměrového listu.

6.2 Vliv podchlazení při montáži

Během montáže sedla do tělesa armatury je nutno sedlo podchladit, neboť se jedná o uložení s přesahem. Díky podchlazení dojde ke smrštění o dvě až tři setiny milimetru. Tento proces se provádí při teplotě -50°C v prostředí suchého ledu. Jelikož sedlo je tvořeno ze dvou materiálů – základního materiálu a návaru, které mají odlišné koeficienty tepelné roztažnosti, mohlo by tudíž v kritické fázi nastat odloupení návaru. Prakticky se pro eliminaci tohoto problému používá ultrazvuková zkouška. Pokud není zjištěna žádná vada, s vysokou pravděpodobností nedojde k odloupení návaru.

6.3 Oprava defektu návaru zjištěného po penetrační zkoušce

Pokud by po navaření a nedestruktivní kontrole byla zjištěna vada v návaru na těsnícím prvku šoupátka (obdobně jako u zkušebního vzorku č. 1), je v tomto případě možnost opravy a není nutno jej vyřadit z výroby. Po nalezení a identifikaci vady v návaru by nejprve muselo dojít k jejímu mechanickému odstranění, tzn. odbrousit, odsoustružit, odfrézovat apod. Dále by opětovně muselo dojít k předebrání součásti a dle typu vady a formy mechanického opracování zvážit druh metody navaření tvrdonávaru. Jedná se o metody ručního navařování metodou TIG 141 dle ČSN EN ISO 4063 pomocí Stelitových tyčí nebo mechanizovaně metodou PTA 152 dle ČSN EN ISO 4063. Po vlastní opravě znovu provést žíhání na snížení vnitřního pnutí, finální opracování a nedestruktivní kontroly. Jestliže by výsledky těchto zkoušek byly vyhovující, je těsnící prvek šoupátka i přes opravu zcela funkční a připraveno k montáži do tělesa armatury.

7 Závěr

Cílem diplomové práce byl návrh postupu navařování a provedení návarů typu Stellite 6 na těsnící prvky šoupátek S43 zhotovených z oceli 15NiCuMoNb5-6-4.

V úvodní části bylo obecně charakterizováno šoupátko S43 a ocel 15NiCuMoNb5-6-4, z něhož je šoupátko vyrobeno. Jedná se o feriticko-bainitickou nízkolegovanou ocel, která se vůči ostatním ocelím tohoto typu odlišuje chemickým složením, zejména zvýšeným množstvím mědi a obsahem niobu a výrazně vyššími hodnotami žáruvzdornosti. Její použití je v rozsahu středních teplot, v rozsahu přibližně $(300 - 450)^{\circ}\text{C}$. Pro tuto ocel byly provedeny výpočty náchylnosti k základním druhům trhlin, které se během svařování a navařování mohly vyskytnout. Bylo zjištěno, že tato ocel není náchylná na vznik teplých trhlin, naopak je náchylná na vznik studených a žíhacích trhlin a může být náchylná na vznik lamelárních a podnávarových trhlin. Proto byla vypsána opatření k eliminaci jejich vzniku.

Po zvážení nejdůležitějších kritérií byla zvolena forma plazmového navařování s přeneseným obloukem a jako přídatný materiál byl zvolen prášek na bázi kobaltu, spolu se zvýšeným obsahem chromu, s označením Stellite 6. Tento přídatný materiál je vhodný nejen pro komponenty energetických zařízení, neboť je odolný vůči korozi, oxidaci, abrazi a teplotním rázům. Návarový kov lze mechanicky opracovávat.

Před zahájením výroby šoupátek S43 byla provedena kvalifikace postupu navařování, která probíhala podle normy ČSN EN ISO 15614-7. Dále byl zpracován rámcový technologický postup výroby zkušebních vzorků a předběžná specifikace postupu navařování. Následovalo provedení výpočtů parametrů pro základní materiál, které se přímo vztahují k vlastnímu navařování. Jedná se o výpočet ekvivalentního uhlíku, rychlosti navařování, tepelného příkonu, teploty přehřevu, teplot tepelného zpracování a teplot Interpass. Rovněž byl proveden návrh nedestruktivních a destruktivních kontrol návarů zkušebních vzorků dle normy ČSN EN ISO 15614-7 spolu s kritérii přípustnosti zkoušek. Na základě vypočtených hodnot a stanovených parametrů bylo provedeno vlastní navaření Stellite 6 na zkušební vzorky. Pro každý zkušební vzorek byly použity odlišné parametry navařování.

Po tepelném zpracování a opracování byly provedeny zkoušky návarů z hlediska ovlivnění základního materiálu a jejich mechanických vlastností. Jednalo se o vizuální kontrolu a ultrazvukové zkoušení, u obou vzorků s vyhovujícími výsledky. Kapilární zkouškou byla u jednoho vzorku zjištěna souvislá liniová vada – trhлина, která je během kvalifikace postupu navařování nepřípustná, a v tomto případě nelze na zkušebním vzorku provést opravu. Proto byl vzorek vyřazen z dalšího zkoušení. Zkouška tvrdosti byla provedena ve třech tloušťkách návaru a výsledné hodnoty jsou pro tento typ návaru přípustné. Rovněž chemické složení návaru ve všech třech tloušťkách odpovídá požadovaným hodnotám. Za kvalifikovanou tloušťku návaru byla zvolena hodnota min. 2,5 mm. Toto je minimální hodnota tloušťky návaru, které se musí dosáhnout při skutečném navařování těsnících prvků. Makrostruktura byla po naleptání shledána bez vad. Mikrostruktura návaru je licí tvořená karbidickým eutektikem v základní CoCr slitinové matici. Mikrostrukturu teplem ovlivněné oblasti u hranice ztavení tvoří popuštěný bainit a ferit, stejně jako u základního materiálu, čímž byl potvrzen předpoklad jeho struktury. Na základě vyhovujících výsledků byl vypracován protokol o kvalifikaci postupu navařování a z něj vyplývající specifikace postupu navařování. Dále byl zpracován technologický postup výroby těsnících prvků armatur spolu s popisem opravy defektu na návaru zjištěného po nedestruktivní zkoušce.

Diplomová práce podává ucelený přehled o činnostech, které probíhají během kvalifikace postupu navařování. Na jejím základě v současné době probíhá vlastní výroba a navařování na těsnící komponenty šoupátek S43.

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivo Hlavatému, Ph.D. z katedry mechanické technologie VŠB – TU Ostrava a svářečskému inženýrovi Ing Janu Kubnému, EWE ze společnosti Armatury Group, a.s., za cenné a podnětné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Děkuji vedení společnosti Armatury Group, a.s. za umožnění vypracování této diplomové práce, jmenovitě p. Josefu Vavřínkovi a Miloši Kušnírovi.

Děkuji operátorovi navařovacího automatu p. Jiřímu Guldovi za provedení návarů zkušebních vzorků, pracovníkům provádějícím destruktivní a nedestruktivní kontroly a všem pracovníkům provádějícím další operace na zkušebních vzorcích i těsnících prvcích šoupátek.

Děkuji své rodině, přátelům a spolužákům, kteří mi pomohli činem, radou, oporou a povzbuzením.

Použité zdroje

- [1] ADAMSKY, F.-J. – TEICHMANN, H. – TOLKSDORF, E. Betriebserfahrungen mit dem warmfesten Werkstoff 15 NiCuMoNb 5 in konventionellen Kraftwerksanlagen. In 22. MPA-Seminar, Beitrag Nr. 12. Stuttgart ,10–11 Oct. 1996. s 667–675.
- [2] ADAMSKY, F.-J. – TÖNNES, F.-G. – TEICHMANN, H.-D. Schaden an der Eco-Falleitung eines 600 MW-Blocks bei der wiederkehrenden Wasserdruckprüfung. In *Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1991*. VGB-Konferenz. Essen, 9–10 Jan. 1991.
- [3] BARTÁK, J., et al. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. 1. vyd. Ostrava: Zerross, 2002. 418 s. ISBN 80 – 85771 – 97 – 7.
- [4] ČSN 05 0211. *Tepelné a mechanické spracovanie zvarových spojov nelegovaných a nízkolegovaných ocelí – Všeobecné zásady*. Praha: Český normalizační institut, říjen 1992. 18 s.
- [5] ČSN EN ISO 15609 – 1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Stanovení postupu svařování – Část 1: Obloukové svařování*. Praha: Český normalizační institut, červenec 2005. 12 s. Třídící znak 05 0312
- [6] ČSN EN ISO 15614 – 7. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 7: Navařování*. Praha: Český normalizační institut, prosinec 2007. 25 s. Třídící znak 05 0313.
- [7] FALTUS, F., et al. *Příručka svařování 2*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1955. 804 s.
- [8] FOLDYNA, V. *Microstructural stability of ferritic 9-12%Cr steels*. Brussels, 1996. Zpráva. COST 501.
- [9] FUJITA, T. Advances in 9-12%Cr ferritic heat resistant steels. In *3rd EPRI conference on advantages in materials technology for fossil power plants..* VISWANATHAN, R., et al. Eds. IOM. Swansea, 2001. s. 33.
- [10] GOODMAN, S.R. – BRENNER, S.S. – LOW, J.R. An FIM-atom probe study of the precipitation of copper from iron-1.4 at pct copper, Part I: Field-iron microscopy, Part II: Atom probe analyses. *Metall. Trans*, 1973, No. 4, s. 2363–2369 a 2372–2378.
- [11] HAARTMAN, K. – KALWA, G. Fünf Jahrzehnte warmfeste Kupfer-Nickel-(Molybdän-) Stähle. *VGB Kraftwerkstechnik*, 1986, Nr. 66, s. 588–598.
- [12] HANSEN, M. – ANDERKO, K. *Constitution of Binary Alloys*. New York: McGraw-Hill, 1958.
- [13] HORNBOGEN, E. – GLENN, R.C. A metallographic study of precipitation of copper from α -iron. *Trans. Metall. Soc. AIME*. 1960, No. 218. s. 1064–1070.

- [14] HORNBOGEN, E. – LÜTJERING, G. – ROTH, M. Kohärente Ausscheidung in Substitutionsmischkristallen des α -Eisens. *Arch. Eisenhüttenwes*, 1966, Nr. 37, s. 523–532.
- [15] HRIVŇÁK, I. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vyd. Bratislava: Veda, 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5
- [16] ITO, Y. – NAKANISHI, M. *Study on Stress Relief Cracking in Welded Low-Alloy Steels*. IIW – X – 668 – 72.
- [17] JANSKY, J. – ANDRÁ, T. – ALBRECHT, K. Feedwater piping guillotine breaks at 340°C operation temperature. In: *Transactions of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*. Amsterdam: North-Holland, 1993. s. 207–214.
- [18] JONŠTA, Z., et al. *Žárupevné oceli a slitiny*. 1. vyd. Žilina: ZUSI, 2002. 392 s. ISBN 80 – 968605 – 6 – 79.
- [19] KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. 2. vyd. Ostrava: Zerross, 2001. 292 s. ISBN: 80 – 85771 – 85 – 3.
- [20] KOUKAL, J. – SCHWARZ, D. – HAJDÍK, J. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava: ES VŠB – TU, 2009. 241 s. ISBN 978 – 80 – 248 – 2025 – 5.
- [21] KOUKAL, J. – ZMYDLENÝ, T. *Svařování 1*. 1. vyd. Ostrava: ES VŠB – TU, 2005. 136 s. ISBN 80 – 248 – 0870 – 6.
- [22] KRŇÁK, R. *Svařování při opravách a údržbě*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1971. 122 s.
- [23] KUBASCHEWSKI, O. *Iron — Binary Phase Diagrams*. Berlin: Springer, 1982.
- [24] LŐBL, K. *Navařování*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1961. 132 s
- [25] OTHEN, P.J. Transmission electron microscope investigation of the structure of copper precipitates in thermally-aged Fe–Cu and Fe–Cu–Ni. *Phil. Mag. Lett.*, 1991, No. 64, s. 383–391.
- [26] OTHEN, P.J. et al. High-resolution electron microscopy studies of the structure of Cu precipitates in α -Fe. *Phil. Mag*, 1994, No.70, s. 1–14.
- [27] PETRŽELA, Z. – KUČERA, J. – BŘEZINA, R. *Technologie slévání, tváření, svařování*. 2. vyd. Ostrava: ES VŠB – TU, 1987. 329 s.
- [28] RAU, P. et al. Schaden und Reparatur an einer Kesseltrommel aus 15 NiCuMoNb 5 (WSB 62). In *Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1991*. VGB-Konferenz. Essen, 9–10 Jan. 1991. s. 444–454.

- [29] RUOFF, H. – KATERBAU, K.-H. *Orientierende TEM-Untersuchungen zur betrieblichen Zähigkeitsabnahme des Werkstoffs WB 36*, 1992. 24 s. Technická zpráva. BMU-Vorhaben SR 471. MPA Stuttgart.
- [30] SCHICK, M. – WIEDEMANN, J. – WILLER, D. *Untersuchungen zur sicherheitstechnischen Bewertung von geschweißten Komponenten aus Werkstoff 15 NiCuMoNb 5 (WB 36) im Hinblick auf die Zähigkeitsabnahme unter Betriebsbeanspruchung*, 1998. Technická zpráva. BMU-Vorhaben SR 2239. MPA Stuttgart.
- [31] SUNDMAN, B. – JANSSON, B. – ANDERSSON, J.-O. The Thermo-Calc databank system. *Calphad*, 1985, No. 9, s. 153–190.
- [32] TANAKA, J. – KITADA, T. *Implant Test for Studying Cold Cracking*. Doc. IIW – IX – 959 – 76.
- [33] TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvarovania*. 1. vyd. Bratislava: ALFA, 1989. 384 s. ISBN 80 – 05 – 00097 – 9.
- [34] WILLER, D. – KATERBAU, K.-H. *Auswertungen und Untersuchungen zur betriebsbedingten Zähigkeitsabnahme des Werkstoffs 15 NiCuMoNb 5*, 1995. Technická zpráva. BMU-Vorhaben SR 2065. MPA Stuttgart.

Elektronické zdroje

- [35] ALTPETER, I., et al. Copper precipitates in 15NiCuMoNb5 (WB 36) steel: material properties and microstructure, atomistic simulation, and micromagnetic NDE techniques. *Nuclear Engineering and Design* [online]. June 2001, vol 206., iss. 2-3, s. 337-350. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4D-42VV809-M&_user=822117&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1137735692&_rerunOrigin=google&_acct=C000044516&_version=1&_urlVersion=0&_userid=822117&md5=fe0a05dd4f613fba2ed0cdf042e295d8>
- [36] ARMATURY Group. *Historie* [online]. [citováno 20.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.armaturygroup.cz/CZ/o-spolecnosti/profil/historie/>>
- [37] ARMATURY Group. *Sortiment* [online]. [citováno 20.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.armaturygroup.cz/CZ/o-spolecnosti/profil/sortiment/>>
- [38] ARMATURY Group. *Obory působení* [online]. [citováno 20.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.armaturygroup.cz/CZ/o-spolecnosti/profil/obory-pusobeni/>>
- [39] ARMATURY Group. *Strategie* [online]. [citováno 20.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.armaturygroup.cz/CZ/o-spolecnosti/profil/strategie/>>

- [40] ARMATURY Group. *Ocelová šoupátka* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 15.12. 2008. [citováno 20.prosince 2009]. Dostupné z: <http://www.armaturygroup.cz/soubory/Produktove%20katalogy%20CZ%20EN/ag_soupatka_cz+en_2008.pdf>
- [41] ARMATURY Group. *Armatury pro energetiku* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 12.11. 2009. [citováno 20. prosince 2009]. Dostupné z: <http://www.armaturygroup.cz/soubory/Produktove%20katalogy%20CZ%20EN/ag_armatury-pro-energetiku_cz+en_2009.pdf>
- [42] Böhler Welding Group. *Žárové nástřiky* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 17.7. 2008. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <http://www.bohler-uddeholm.cz/czech/files/zarove_nastriky.pdf>
- [43] Castolin Eutectic. *Wear & Fusion Technology: Plasma Transferred Arc Powders* [online]. [citováno 27.prosince 2009]. Dostupné z: <http://www.castolin.com/wCastolin_com/products/coating/pta_powders.php?navid=123>
- [44] ČERVENÁK, M. *Ocelové bezešvé trubky, výrobní program – VTTŽ* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 29.9. 2009. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.trubky.cz/doc/vvtkatalog.pdf>>
- [45] Deloro Stellite. *STELLITE® 6 ALLOY: TECHNICAL DATA* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 31.1. 2008. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.stellite.co.uk/Portals/0/Stellite%206%20Final.pdf>>
- [46] ESAB. *Příručka svařování: Opravy a renovace* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 20.8. 2008. [citováno 5.března 2010]. Dostupné z: <http://products.esab.com/ESABImages/opravy_renovace.pdf>
- [47] ENG – TIPS FORUMS. *DIN WB36 steel: ASTM EQUIVALENT?* [online]. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.eng-tips.com/viewthread.cfm?qid=75599&page=67>>
- [48] HLAVATÝ, I. *Rozdělení ocelí dle TNI CEN ISO/TR* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 14. dubna 2008. [citováno 5.března 2010]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/Vyuka/Rozdeleni_oceli_15608_2008.pdf>
- [49] Tyco flow control. *High Pressure Forged Steel Check Valves* [online]. Vytvořeno 13.5. 2002. Aktualizace 14.5. 2002. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <www.tycovalves-na.com/Id/RAILT-0007-EN.pdf>
- [50] PREIS, U. *Welding filler metals for power plant engineering* [online]. Vytvořeno 10.1. 2008. Aktualizace 29.2. 2008. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <http://www.tput.com/english/files/welding_filler_metals_for_plant_engineering_01_2008.pdf>

- [51] KSK Plazmové navařovací automaty řady PPC 250 [online]. Aktualizace 21.3. 2007. [citováno 25.října 2009]. Dostupné z: <<http://www.svareni.cz/stroje/plazma/plazma.html>>
- [52] OCHODEK, V. *Informační vstupy pro popis technologických postupů svařování (WPS)* [online]. Vytvořeno a aktualizováno 12.5. 2008. [citováno 6.února 2010]. Pozn.: Komprimováno v aplikaci ZIP. Název souboru: Popis_WPS_08.pdf. Dostupné z: <<http://www.345.vsb.cz/KEvyuka/Ochodek/Literatura.zip>>
- [53] Plasma-Master. *Plasma transferred arc surfacing (PTA-surfacing)* [online]. Aktualizace 6.4. 2009. [citováno 25.října 2009]. Dostupné z: <http://www.plasma-master.com.ua/eng/science/science_pta.htm>
- [54] ŠMÁTRALOVÁ, M. – SOBOTKA, J. – VODÁREK, V. Vztah mikrostruktury a mechanických vlastností konstrukční oceli 15NiCuMoNb5 pro pláště kotlů a tlakové nádoby. In *Metal 2004 Hradec nad Moravicí* [online]. Vytvořeno 4.5. 2004. [citováno 22.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://konference.tanger.cz/data/metal2004/sbornik/papers/11.pdf>>
- [55] SA Servis armatur. *Plazmové navařování (PTA – Plasma transferred Arc)* [online]. [citováno 25.října 2009]. Dostupné z: <<http://www.servisarmatur.cz/?c=navar-pta>>
- [56] STELLITE ALLOY 6 [online]. Vytvořeno a aktualizováno 3.5. 2008. [citováno 15.prosince 2009]. Dostupné z: <<http://www.adorfon.com/products/fma/pdfs/stellite6.pdf>>
- [57] SVARINFO.cz. *Výpočet uhlíkového ekvivalentu Cekv* [online]. [citováno 5.března 2010]. Dostupné z: <<http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=cekv>>
- [58] ŠEVČÍK, Miroslav. *Nabídka svařovacího automatu PPC 250PTM pro Armatury Group a.s.* [online]. Česká Třebová. Vytvořeno 20. 5. 2009. [citováno 15.prosince 2009]. Pozn. soubor PDF. Volně nedostupné – interní materiál společnosti Armatury group a.s.
- [59] TICHÝ, J. *SVARFORUM.cz - forum o svářečkách a svařování* [online]. Aktualizace 24.3 2008. [citováno 10.dubna 2009] Dostupné z : <<http://www.svarforum.cz/forum/viewtopic.php?id=426>>
- [60] WIKIPEDIE Otevřená encyklopedie. *Karbidy* [online]. Aktualizace 24.9. 2009. [citováno 3. ledna 2010]. Dostupné z: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Karbid>>

Seznam příloh

- Příloha č. 1** Atest přídavného materiálu Stellite 6 firmy Castolin Eutectic, ozn. EuTroLoy 16006.
- Příloha č. 2** Navařovací automat PPC 250 PTM – informace a technické údaje.
- Příloha č. 3** Výrobní výkresy zkušebních vzorků, zpracováno v programu AutoCad.
- Příloha č. 4** Předběžná specifikace postupu navařování pWPS 7R-1268 pro oba zkušební vzorky.
- Příloha č. 5** Seznam použitých norem k provádění kontrol zkušebních vzorků.
- Příloha č. 6** Dokument WPQR 7P-1268 – první 2 strany
- Příloha č. 7** Informační protokol o výsledcích spektrometrické analýzy chemického složení návaru prováděné ve společnosti Armatury Group, a.s.
- Příloha č. 8** Objednávkové listy na provádění zkoušek ve společnosti Vítkovice Testing Center.
- Příloha č. 9** Výsledky mechanických zkoušek, zkoušky tvrdosti.
- Příloha č. 10** Protokoly o zkoušení, rozbor chemického složení.
- Příloha č. 11** Protokol o zkoušení, makrostruktura a mikrostruktura.
- Příloha č. 12** Kvalifikace postupu navařování WPS 7S-1268.
- Příloha č. 13** Výrobní výkres sedla šoupátka, zpracováno v programu AutoCad.
- Příloha č. 14** CD.

Pozn. Přílohy č. 3 a 13 – výkresy, jsou uvedeny samostatně v kapse na rubu zadních desek.